



**Maisterintutkielma / Magisteravhandling /
Master's thesis**

**Opintosuunta / Studieriktning / Study track
Geologia / Geologi / Geology**

Geokaasut kulta-kuparianomalioiden havaitsemisessa Länsi-Lapissa

Noora Karhu

marraskuu 2020

Ohjaajat / Handledarena : / Supervisors :
Veli-Pekka Salonen ja Kirsti Korkka-Niemi

Geologian ja geofysiikan maisteriohjelma / Magisterprogram i geologi och
geofysik /
Master's Programme in Geology and Geophysics

Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta / Matematisk-naturvetenskapliga
fakulteten / Faculty of Science

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme Geotieteiden ja maantieteen laitos
Opintosuunta – Studierikting – Study track Geologia / Geokemia ja ympäristögeologia		
Tekijä – Författare – Author Noora Karhu		
Työn nimi – Arbetets titel – Title Geokaasut kulta-kuparianomalioiden havaitsemisessa Länsi-Lapissa		
Työn laji – Arbetets art – Level Pro gradu -tutkielma	Aika – Datum – Month and year 11/2020	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 47
Tiivistelmä – Referat – Abstract <p>Geokemiallinen malminetsintä geokaasuilla perustuu MMI-menetelmän tavoin mobiilien metalli-ionien liikkumiseen. Oletuksena on, että maapeitteen alla piilossa oleva mineralisaatio on paikannettavissa pintamaasta otetuilla näytteillä. Tässä tutkimuksessa kulta-kuparianomalioiden havaitsemista geokaasujen avulla testattiin Länsi-Lapin jäänjakajavyöhykkeellä kolmella eri alueella.</p> <p>Geokaasunäytteet kerättiin aktiivisen kaasunkeräimen avulla 25 cm maannoksen alarajan alapuolelta. Näytteet kuplitettiin typpihappoon ja analysoitiin ICP-MS:llä. Tutkitut alkuaineet olivat As, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, U ja Zn. Arseenin, koboltin, elohopean ja nikkelin pitoisuuksia havaittiin kaasunäytteissä vähän.</p> <p>Hannukaisen kaivosalueella geokaasuja kerättiin tunnetun malmiutuman luota ja kaasupitoisuudet osoittivat selvän anomalian suoraan malmikiven yläpuolella. Kelontekemässä geokaasujen pitoisuuksia verrattiin läheltä kerättyjen maaperänäytteiden MMI-tuloksiin. Kaasujen ja maaperänäytteiden pitoisuuksien välillä näyttää olevan yhteys, mutta maaperänäytteiden pitoisuudet ovat usein tuhatkertaisesti suurempia. Jolhikon alue toimi tutkimuksessa tausta-alueena, joka mahdollisti vertailun mineralisaation sisältävän ja arvometalleista tyhjän alueen välillä.</p> <p>Tämän tutkimuksen valossa geokaasut ovat toimiva työkalu geokemialliseen malminetsintään, mutta kompleksisen ilmiön ymmärtäminen vaatii lisää tutkimista. Geokaasujen käyttö edellyttää myös näytteenottajilta erityistä huolellisuutta kontaminoitumisriskien minimoimiseksi.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Geokaasu, anomalia, geokemia, malminetsintä		
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited HELDA – Helsingin yliopiston digitaalinen arkisto		
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information		

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Faculty of Science		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme Department of Geosciences and Geography	
Opintosuunta – Studierikning – Study track Geology / Geochemistry and Environmental Geology			
Tekijä – Författare – Author Noora Karhu			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Geogases in the detection of gold-copper anomalies in Western Lapland			
Työn laji – Arbetets art – Level Master`s thesis	Aika – Datum – Month and year 11/2020	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 47	
Tiivistelmä – Referat – Abstract <p>Geochemical ore exploration with geogases is based, like the MMI method, on the movement of mobile metal ions. The assumption is that the buried mineralization is possible to locate using the samples collected from the surface sediment. In this study, the detection of gold-copper anomalies by geogases was tested in three different regions of the West Lapland ice divide zone.</p> <p>Geogas samples were collected using an active gas collector at 25 cm below the lowest visible soil horizon. The samples were bubbled into nitric acid and analysed with ICP-MS. The elements studied were As, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, U and Zn. Only few elevated levels of arsenic, cobalt, mercury and nickel were found in the gas samples</p> <p>In the Hannukainen mining area, geogases were collected at known ore settlement, in which gas concentrations showed a clear anomaly in soil directly above the outcropping ore. At Kelontekemä, the concentrations of geogases were compared with MMI results from soil samples collected nearby. There appears to be a connection between concentrations of gases and soil samples, but the concentrations of soil samples are often a thousandfold higher. In this study, the Jolhikko region served as a background area, which allowed to conduct a comparison between the area containing mineralization and the background area of precious metals.</p> <p>In light of this research, geogases are a working tool for geochemical ore exploration. However, and in order to understand the complexity of this phenomenon, it is necessary to conduct further studies. The use of geogases also requires special care from samplers to minimize contamination risks.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Geogas, anomaly, geochemistry, mineral exploration			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited HELDA – Digital Repository of the University of Helsinki			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Sisällysluettelo

1.	JOHDANTO	4
2.	TUTKIMUSALUEIDEN KUVAUS	7
2.1.	Tutkimusalueiden geologia.....	8
2.2.	Hannukainen	10
2.3.	Kelontekemä	12
2.4.	Jolhikko.....	13
3.	TUTKIMUSMENETELMÄ JA NÄYTTEET	14
3.1.	Tutkimusmenetelmä ja näytteenotto	14
3.2	Geokaasunäytteet ja analysointi.....	17
3.2.1.	<i>Tulosten muuttaminen kaasupitoisuuksiksi</i>	19
4.	TULOKSET.....	19
4.1.	Nolla- ja ilmanäytteet.....	19
4.2.	Kokonaistulokset ja tulosjakauma alueiden välillä.....	21
4.3.	Hannukainen	24
4.4.	Kelontekemä	26
4.5.	Jolhikon tutkimuslinja yksi	28
4.6.	Jolhikon tutkimuslinja kaksi	30
5.	TULOSTEN TARKASTELU.....	32
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET	37
7.	KIITOKSET.....	38
8.	VIITELUETTELO.....	39
9.	LIITTEET	41

1. JOHDANTO

Malminetsinnässä on käytetty 1990-luvun lopulta lähtien rutiininomaisesti hyväksi erilaisia maaperänäytteiden uuttomenetelmiä. Menetelmien käyttö perustuu oletukseen, että kallioperässä olevasta, paksun rapautumakuoren tai nuorempien sedimenttien peittämästä mineralisaatiosta nousee mobiileja metalli-ioneita (MMI) maanpintaa kohti, mikä ilmenee geokemiallisena anomaliana suoraan mineralisaation yläpuolisessa maannoshorisontissa (Birrell 1996, Mann et al. 1998). Anomalioiden avulla syvällä piilossa olevat mineralisaatiot on mahdollista paikantaa pintamaasta otetuilla näytteillä, kunhan näytteenottosyvyys on optimaalinen 10–25 cm maannoksen rajan alapuolelta (Cameron et al. 2004, Fabris et al. 2009). Kapillaarinousu ja haihdunta johtavat metalli-ionien ensisijaiseen kerääntymiseen kyseiselle syvyydelle (Mann et al. 2005).

Uuttomenetelmistä erityisen tärkeäksi malminetsinnän työkaluksi on vakiintunut MMI-heikkouuttomenetelmä, jonka Birrell (1996) kuvasi jo 1990-luvun alussa. Menetelmä hyödyntää vahvoja ligandeja sisältäviä uuttoaineita, joilla liuokseen irrotetaan maaperänäytteestä malminetsinnällisesti kiinnostavia sitoutumattomia tai heikosti kiinnittyneitä metalli-ioneita ilman, että tutkimuksen kannalta turhat matriksin materiaalit liukenevat. Uuton jälkeen liuos on valmis analysoitavaksi ICP-MS -tekniikalla. MMI-menetelmää sovelletaan etenkin Cu-Au, Pb-Zn sekä nikkelimalmien paikantamiseen, ja analysoitavia alkuaineita ovat ainakin Cu, Pb, Zn, Ni, Cd, Au, Ag, Co ja Pd. Koska mineralisaation yläpuolella olevien pitoisuuksien ja taustapitoisuuksien ero näytteissä on tavallisesti selvä eivätkä alueen suuret vuotuiset sademäärät, rapautuminen tai edes glasiaaliympäristöissä tapahtunut maa-aineksen kulkeutuminen peitä vahvoja anomaliajälkiä, menetelmä sopii malminetsinnän kohdentamisvälineeksi uusien mineralisaatioiden löytämiseen hyvin erilaisissa geologisissa ympäristöissä. (Mann et al. 1998)

Aspandiar et al. (2006) ovat laatineet mobiilien metallien kulkeutumisesta laajan yhteenvedon, joka pureutuu kompleksisen ilmiön teoreettisiin syntymekanismeihin. Pohjaveden pinnan alapuolella potentiaalisia metallien kuljettajamekanismeja ovat diffuusio, laimeneminen, pohjaveden virtaus, konvektio, elektrokemiallinen migraatio ja kaasukuplat, kun taas vadoosivyöhykkeessä kyseeseen tulevat kapillaarinousu, kaasukuljetus ja biologinen aineenvaihdunta. Etenkin vadoosin vyöhykkeen prosessit

ovat ratkaisevassa osassa metallien kulkeutumisessa pintamaahan. Maaperän laatu ja vallitsevat olosuhteet määrittävät viime kädessä, mitkä kuljetusmekanismeista kulloinkin ovat pääosassa tai vaikuttavat yhdessä geokemiallisten anomalioiden muodostumiseen. Ilmiön ymmärtämiseen liittyy yhä lukuisia arvoituksellisia piirteitä, eikä mikään yksittäinen liuotusmenetelmä, kuten MMI, ligandiliuos, kuningasvesi- tai ioniuutto, ole siksi kaikkialla toimiva tai yksiselitteisesti ylivoimainen muihin menetelmiin nähden. Etenkin kemiallisesti liikkuvammilla alkuaineilla, esimerkiksi sinkillä, kadmiumilla ja nikkelillä, on muita tutkittavia alkuaineita useammin tilanteita, joissa MMI-uutolla saadaan pitoisuuksia, mutta huonoja tai epäselviä anomaliaita (Mann et al. 1998).

Maaperän kaasukoostumusta on alettu tutkia malminetsintätarkoituksessa 1970-luvulta alkaen (Hale 2010). Osa mineralisaation alkuaineista voi malmityypistä riippuen olla volatiileja (Hg, I, As, Se), ja myös mineralisaation rapautuessa syntyy usein kaasuja (COS, CO₂, SO₂, CH₄, Rn, He) kiviaineksen hapettuessa (Aspandiar et al. 2006). Hirner et al. (1998) ovat tutkineet kaasumaisessa muodossa liikkuvien organometalliyhdisteiden soveltuvuutta geokemialliseen malminetsintään ja saaneet etenkin elohopean osalta onnistuneita tuloksia. Toisaalta elohopean kulkeutumisessa ja virtaamisessa ilmakehään on myöhemmin osoitettu olevan merkittävää kausiluontoista vaihtelua (Klusman 2009). Polito et al. (2002) ja Hale (2010) taas ovat todenneet maaperän peruskaasukoostumuksen voivan heijastella sulfidimineralisaatiota, sillä mineralisaation yläpuolella geokaasun hiilidioksidi- ja happipitoisuudet esiintyvät eri suhteessa toisiinsa tausta-alueiden pitoisuussuhteisiin verrattuna. Sulfiitin hapetusreaktion takia maaperän kaasukoostumus köyhtyy hapestä ja syntyy rikkidioksidia, joka reagoi maaperässä edelleen hiilidioksidipitoisuutta kasvattaen. Sulfidihapetuksen sivutuotteena on pintamaasta löydettävissä myös niukkaliukoista metastabiilia karbonyylisulfidikaasua (Hale 2010).

Cao et al. (2010) tutkimukset ovat osoittaneet, että maan alla ylöspäin virtaavat kaasut kuljettavat mukanaan kultaa varautuneina nanopartikkeleina, jotka maanpinnan läheisyydessä kiinnittyvät sitten sekundäärimineraalien ja orgaanisten partikkeleiden pintaan. Havainto korostaa kaasukuljetuksen merkitystä anomalioiden syntymekanismina etenkin kuivilla alueilla. Koska kultapartikkelien lisäksi tietyt mineraalit, kuten kaoliniitti, halloysiitti, götiitti ja hematiitti, ovat varautuneita, on kultaa paksujen maakerrosten alta etsittäessä otettava huomioon kullan nanopartikkelien vuorovaikutus tiettyjen kivilajien kanssa, mikä näkyy kullan konsentraation pienentymisenä kaasuissa.

Cameron et al. (2004) mukaan kuivan ja puolikuivan ilmaston alueilla vadoosivyöhykkeen ulottuessa syvälle ainoa anomalioiden kehittymistä selittävä tarpeeksi nopea metalli-ionien kulkeutumistapa on advektiokuljetus, mitä ilmanpaineeroista johtuva pumppausefekti vielä jouduttaa. Konsentraatioeroihin perustuva diffuusio on moninkertaisesti hitaampaa, vaikka diffuusio onkin olennainen kaasujen liikkumisen mekanismi (Cameron et al. 2004, Hale 2010). Aspandiar et al. (2006) nostavat advektion ja diffuusion rinnalle kaasukuplien kulkeutumisen yhtenä kaasujen liikkumisominaisuutena. Esimerkiksi maanalaisella mikrobitoiminnalla voi olla tärkeä rooli pintamaahan kaasukuplina liikkuvien kaasujen liikkeellepanijana (Klusman 2009). Kostean ilmaston alueilla anomalian muodostumista ohjailevat erilaiset mekanismit ja pohjaveden rooli on usein merkittävä (Cameron et al. 2004).

Malmqvist ja Kristiansson (1984) esittivät ensimmäisinä, että mineralisaatioiden metallipartikkelit voivat kohota maan pintaan nousevien kaasuvirtojen mukana. Etenkin Kiinassa havainto innosti tutkijoita geokaasututkimusten pariin 90-luvun alusta lähtien (Wang et al. 2008), koska Kiinan paksut lössikerrostumat ovat malminetsintäympäristöinä haastavia. MMI-menetelmillä mineralisaatiot ovat ihanteellisissa tapauksissa paikannettavissa peräti 50–150 metrin syvyisten maakerrosten alta (Fabris et al. 2009), ja kaasukuljetus soveltuu mineralisaatioiden etsimiseen paksumpien sedimenttipeitteiden alta jopa muita menetelmiä paremmin (Cao et al. 2010). Geokaasujen erittäin pienet (ppb tai ppt suuruiset) mutta anomaliset metallipitoisuudet osoittavat mineralisaation sijainnin, kun kaasunäytteistä on vähennetty nollanäytteiden arvot (Wang et al. 2008).

Geokaasumenetelmän suurin haaste on ollut kaasun keruuseen soveltuvan tekniikan kehittäminen. Wang et al. (2008) ovat tutkineet erilaisten kaasunkeräinten toimivuutta ja todenneet nestemäiset keräimet ylivoimaisiksi kiinteisiin keräimiin verrattuna. Nestemäisten kaasunkeräinten etuna on, että näyteliuos valmistetaan ultrapuhtaista aineista laboratorioympäristössä ja näyte on suoraan analysoitavassa liuosmuodossa, jolloin kontaminaatiota syntyy vähän ja nollanäytteiden arvot pysyvät matalina. Vaihtoehtoisten kuplitusliuosten testaaminen lisäksi osoitti, että nollanäytteiden arvoja on mahdollista pienentää käyttämällä kuplitukseen typpihappoa. Rinnakkaisnäytteiden avulla näytteiden edustavuus paranee entisestään. (Wang et al. 2008)

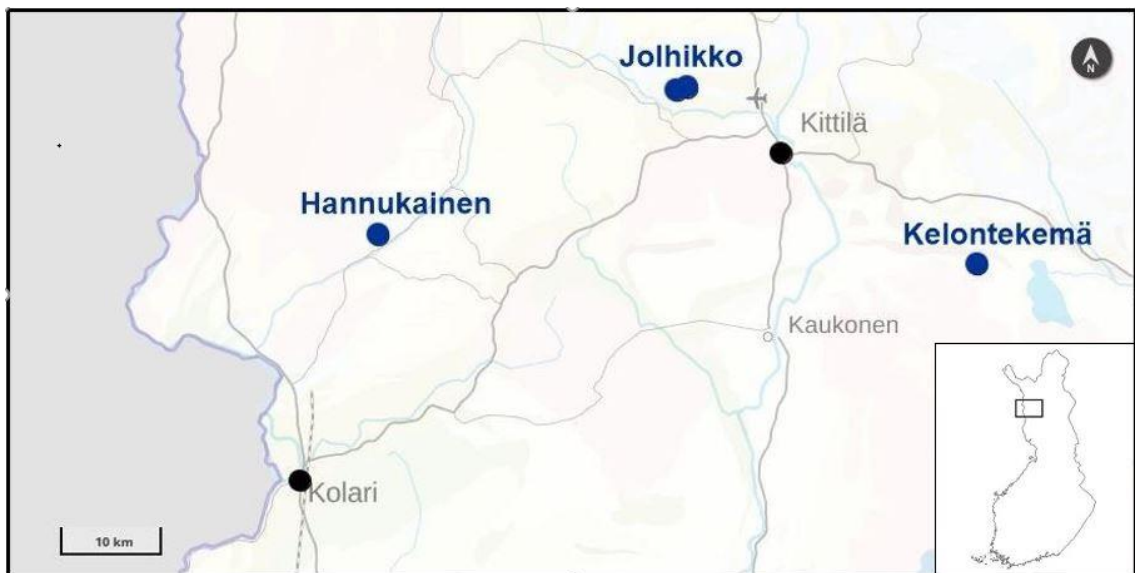
Koska ymmärrys geokaasujen anomalian muodostumismekanismeista ja kaasuihin kulloinkin vaikuttavien tekijöiden vuorovaikutuksesta on vasta hahmottumassa, on ollut kiistanalaista, ovatko havaitut ilmiöt ja kaasujen pitoisuudet lähtöisin mineralisaatioista itsestään. Wan et al. (2017) testasivat äskettäin geokaasumenetelmää jäljittämällä geokaasussa esiintyvän metallin alkulähteen lyijyn isotooppisuhteiden avulla. Mineralisaation läheisyydestä otettujen kaasunäytteiden ja tausta-alueen näytteiden Pb-isotooppisuhteet erosivat selvästi toisistaan ja taustasta poikkeavien näytteiden Pb-isotooppisuhteet levisivät mineralisaation ympärille osoittaen, että geokaasujen lyijy on peräisin juuri mineralisaatiosta. Kiinassa onkin paikannettu onnistuneesti useita piilossa olevia mineralisaatioita geokaasujen avulla, ja tulevaisuudessa geokaasut voivat tarjota työkalun malminetsintään erityisesti paksun maapeitteen alueilla, joilla muut menetelmät epäonnistuvat (Gao et al. 2011, Wan et al. 2017). Coker (2010) on todennut, että malminetsinnän siirtyessä yhä paksumpien maapeitteiden alueille, metallien liikkuvuuden ymmärtämisen tärkeys korostuu ja siten kompleksisen kaasukuljetuksen hallinta on osa tulevaisuuden tutkimussuuntausta.

MMI-heikkouutot ovat osoittautuneet toimiviksi malminetsinnän työkaluiksi suhteellisen nuorissa sedimenteissä, esimerkiksi Lapin moreeneissa (esim. Ahola 2009). Koska mineralisaatiot eivät aina näy pintamaassa anomalioina eivätkä kaikki anomaliat välttämättä merkitse mineralisaation läsnäoloa (Mann et al. 1998), maaperänäytteiden käyttö ei silti ole aukotonta. Geokaasuja Lapissa ei tiettävästi ole aiemmin tutkittu. Tämän tutkimuksen tarkoitus on testata geokaasumenetelmän toimivuutta kultakuparianomalioiden havaitsemiseen Lapin paksujen maapeitteiden alueella. Tutkimusta varten geokaasuja kerättiin kolmelta eri alueelta, jotta menetelmän teho voitaisi sekä varmistaa tunnetun mineralisaation avulla että nähdä geokaasujen pitoisuuksien ero mineralisaation sisältävän alueen ja tausta-alueen välillä. Kolmannen alueen avulla verrattiin lisäksi geokaasumenetelmän ja yleisesti käytetyn MMI-menetelmän maaperänäytteiden pitoisuuksia geokemiallisen malminetsinnän osumatarkkuuden parantamiseksi.

2. TUTKIMUSALUEIDEN KUVAUS

Tämän tutkimuksen kaikki kolme tutkimusaluetta sijaitsevat Pohjois-Suomen Länsi-Lapissa Kolarin ja Kittilän seudulla (Kuva 1), joka on rautaoksidi-kupari-kulta (IOCG) -

esiintymien potentiaalista aluetta (Niiranen 2005). Tutkimusalueet valittiin siten, että tutkimuslinjoilla maaperän kerrosjärjestys olisi samankaltainen, mutta alueet poikkeaisivat pohjatietojen valossa toisistaan geokemiallisten piirteidensä suhteen. Tutkimusalueista Hannukainen on historiansa takia paljon menneinä vuosikymmeninä tutkittu, Kelontekemä ja Jolhikko taas olivat kaasunäytteiden keräämisen aikaan yhä luonnontilaisia metsäalueita, joilla Northland Mines Oy oli suorittanut malminetsintää. Vaikka Hannukaisen tutkimusalue sijoittuu Hannukaisen vanhalle rautakaivosalueelle, on sieltä valittu geokaasujen tutkimiseen myllertämätön maakaistale Laurinojan avolouhoksen itäpuolelta, jotta maaperä olisi mahdollisimman häiriintymätön ja tulokset vertailukelpoisia.



Kuva 1. Tutkimusalueiden sijainti. (Maanmittauslaitos)

2.1. Tutkimusalueiden geologia

Tutkimusalueet sijaitsevat Fennoskandian kilven arkeisella kallioperäalueella, jota luonnehtivat valtakivilajeina metamorfiset gneissit, migmatiitit ja hajanaisten, muinaisen tulivuoritoiminnan tuloksena alkunsa saaneiden vihreäkivivyöhykkeiden kivet (Lehtinen et al. 1998). Vihreäkivivyöhykkeet ovat tunnetusti malmipotentialista aluetta, ja tutkimusalueet sijoittuvat Keski-Lapin vihreäkivivyöhykkeen läntiseen osaan. Alueen kallioperässä näkyvät vahvasti myös Svekofennisen vuorijononmuodostuksen jäljet, sillä

kallioperä on muuttunut monivaiheisen deformaation ja metamorfoosin seurauksena (Hiltunen 1982, Niiranen ja Eilu 2007).

Tutkimusalueista Hannukainen sijaitsee Kolarin hiertovyöhykkeellä ja Kelontekemä ja Jolhikko aivan hiertovyöhykkeiden vieressä (Niiranen ja Eilu 2007). Alueilla tavataan yleisesti metasedimenttejä ja metavulkaniitteja, kuten Savukosken ryhmän pintakiviä, monzoniitti- ja dioriitti-intruusioiden kiviä sekä vähäisessä määrin granitoideja (Lehtonen et al. 1998, Niiranen ja Eilu 2007, Ojala et al. 2007). Hannukaisen tutkimusalue on pääosin kvartsimonzoniittia ja kvartsiittia, mutta etenkin tutkimuslinjan kohdalla on dioriittia ja Rautuvaaran muodostumaan liittyvää karsimalmia ja amfiboliittia. Kelontekemässä valtakivilaji on arkoosikvartsiitti, johon liittyy Pittarovan muodostuman serpentiniittejä. Jolhikossa sen sijaan on Pittarovan muodostuman fylliittejä, diabaaseja ja grafiittiliuskeita. (Geologian tutkimuskeskus 2020, lyh. GTK)

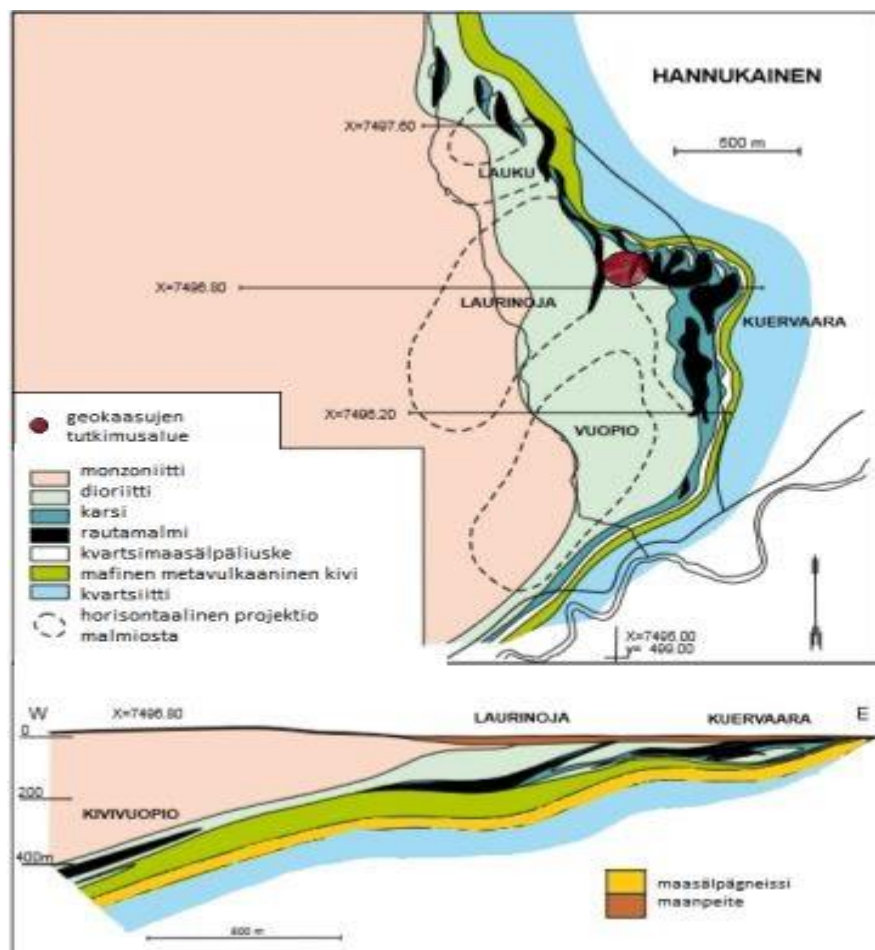
Pohjois-Suomen kallioperä on lähes kauttaaltaan glasiaalikerrostumien peitossa. Eilun et al. (2007) mukaan kerrostumat koostuvat pääosin moreenista ollen keskimäärin viiden metrin paksuisia. Tämän tutkimuksen alueet sijaitsevat kuitenkin jäänjakajavyöhykkeellä, jossa kvartaarikaudella Skandinavian mannerjäätiköt muodostuivat ja jäätikön jäännökset sulivat viimeisinä pois lähes sijoilleen. Jäänjakajavyöhykkeelle on ominaista sulamisvesien hienorakeisten sedimenttien puuttuminen ja vähäinen jäätikön aiheuttama eroosio, jonka ansiosta useiden aiempien jäätiköitymiskausien kerrostumat ovat säilyneet, kun vielä jäinen maa on suojellut sedimenttejä (Johansson 2005, Salonen et al. 2011). Tutkimusalueiden maaperän alkuperä tulee esiin esimerkiksi pintamaan paksuudessa, kerrosjärjestyksessä, vedenläpäisevyydessä sekä kohonneissa alkuainepitoisuuksissa.

Sekä Jolhikko että Kelontekemä kuuluvat arseeni- ja metalliprovinssiin, mikä tarkoittaa moreenimaan pitoisuuden olevan alueilla arseenin, koboltin, kuparin, kromin, nikkelin, sinkin tai vanadiinin osalta suurempi kuin Suomen maaperässä keskimäärin (GTK 2020). Vihreäkivialueilla moreenimaa on luonnostaan raskasmetalleista rikastunut esimerkiksi alumiinin, kullan, kalsiumin, koboltin, kromin, kuparin, raudan, magnesiumin, mangaanin, nikkelin, skandiumin, titaanin ja vanadiinin suhteen, koska kyseiset alkuaineet ovat mafisissa kivissä yleisiä (Koljonen et al. 1992). Jäänjakaja-alueen tavallista paksummat moreenipeitteet tarkoittavat siten enemmän kertynyttä materiaalia.

2.2. Hannukainen

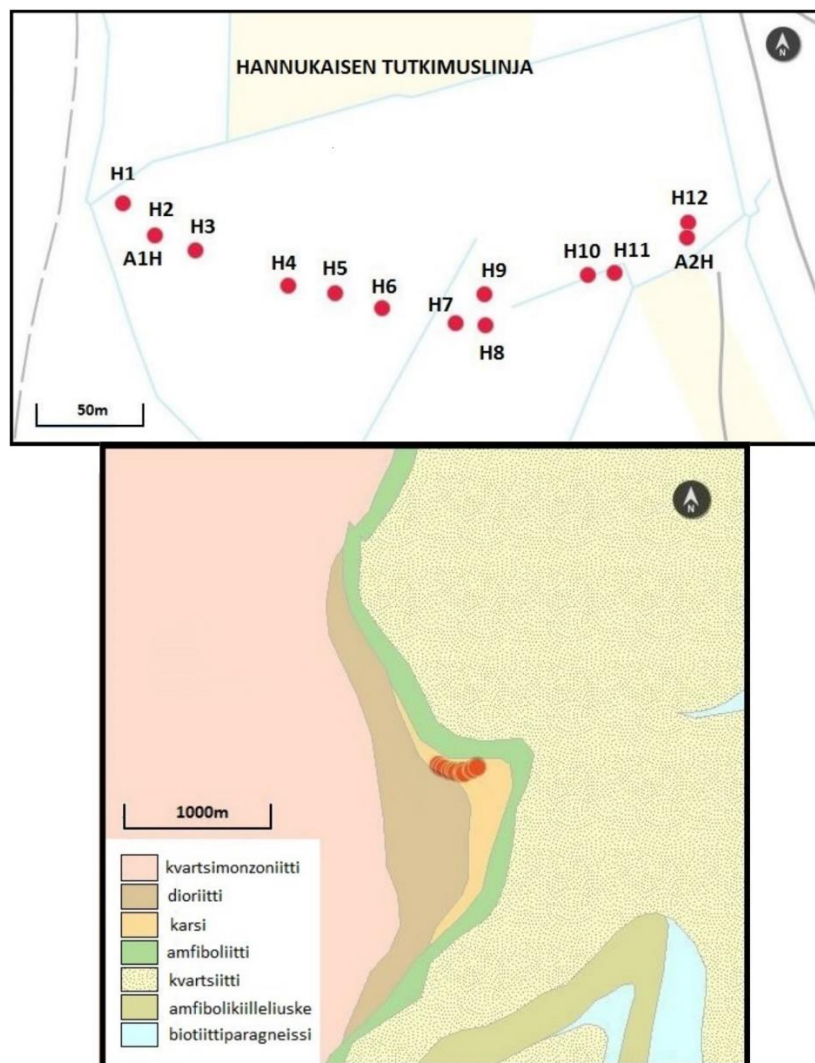
Hannukaisen rautamalmiesiintymää ovat louhineet sekä Rautaruukki Oy että Outokumpu Oy. Laurinojan avolouhos, jonka vieressä geokaasujen tutkimuslinja sijaitsee, on ollut toiminnassa vuosina 1978-1990 (Niiranen ja Eilu 2007). Louhinta on ollut tauolla 90-luvun alusta lähtien, mutta Northland Mines Oy ja sittemmin Hannukainen Mining Oy ovat valmistelleet avolouhostoiminnan uudelleenkäynnistämistä (Hannukainen 2020).

Hannukaisen esiintymä edustaa tyypiesimerkkiä IOCG-malmiesiintymästä. Laurinojassa kulta ja kupari esiintyvät rautamalmissa ja karsissa, ja tyypillinen mineraaliseurue on Niirasan ja Eilun (2007) mukaan magnetiitti, kuparikiisu, rikkikiisu ja joskus lisänä magneetikiisu. Rakenteellisesti mineralisaatio on asettunut siten, että arvometallilinnit lepäävät mineralisoituneen siirrosalueen taitekohdassa (Kuva 2).



Kuva 2. Havainnekuva malmin sijoittumisesta maan alla ja geokaasujen tutkimuslinjan sijainnista. (Mukaillen Hiltunen (1982) Ojala et al. 2007 mukaan)

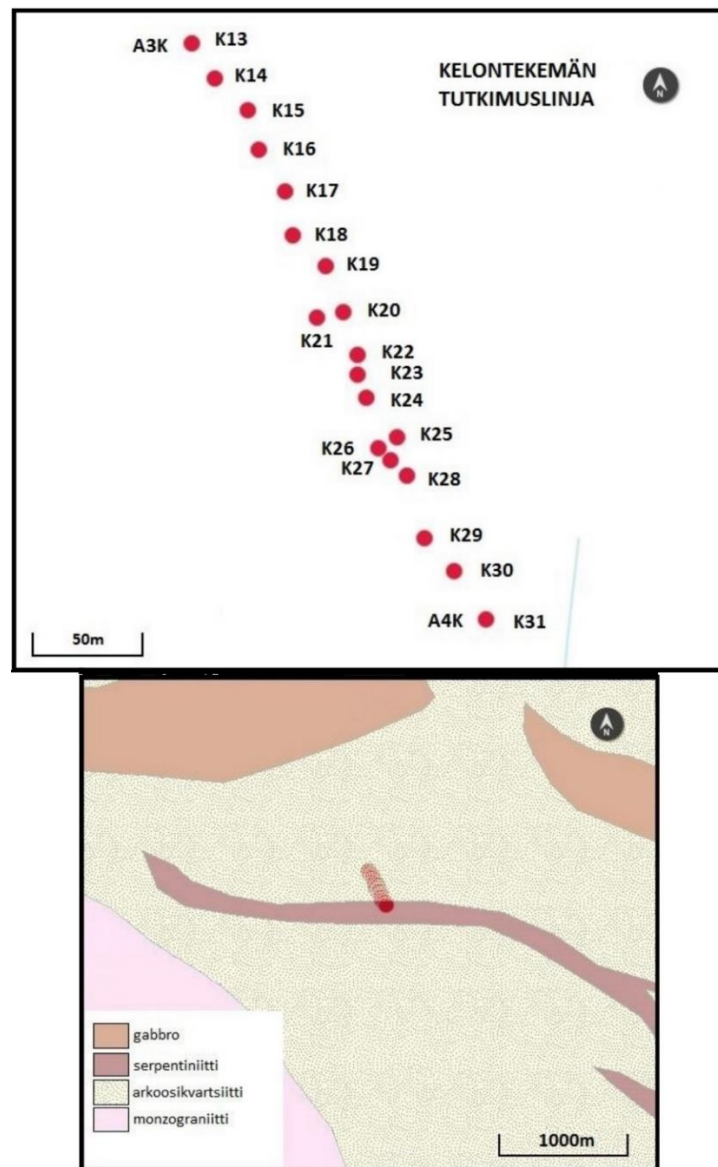
Hannukaisen tutkimuslinja (Kuva 3 a.-b.) edustaa geokaasututkimuksessa kohdetta, jolla on havaittu selkeät MMI-anomaliat ja tunnettu kallioperän mineralisaatio. Kahdentoista näytteen tutkimuslinja kulkee osin malmitutuman päällä. Viimeisimmän jääkauden aikaiset, neljää eri jäätiköitymisvaihetta edustavat moreenit ja niiden välissä olevat hiekka- ja sorakerrostumat peittävät suurelta osin alueen kallioperää. Hiekkaa ja soraa on kerrostumista huomattava määrä, jopa 70 prosenttia. (Salonen et al. 2011) Moreenikerroksen paksuus vaihtelee alueella kahdeksan ja kahdenkymmenen metrin välillä (Pöyry 2008), mutta geokaasujen tutkimuslinjalla maaperän paksuus on maatulka-aineiston mukaan noin yhdestätoista kolmeentoista metriä (Northland 2013). Moreenikerrostumien osalta vedenjohtavuuden on todettu olevan kohtalainen, hiekkojen ja sorien osalta hyvä (Salonen et al. 2011).



Kuva 3 a.-b. Hannukaisen tutkimuslinja (H) ja linjan sijoittuminen kallioperäkartalla. (Maanmittauslaitos ja GTK)

2.3. Kelontekemä

Kelontekemä on ollut yksi Northland Mines Oy:n malminetsintäkohteista, ja nykyään alueen malminetsintäluvan haltija on Hannukainen Mining Oy. Kelontekemässä tutkimuslinja kulkee malminetsinnän kannalta kiinnostavan mineralisoituneen vyöhykkeen yli, jossa MMI-anomaliaa ei havaita. Kelontekemän linja (Kuva 4 a.-b.) on tutkimuksen pisin käsittäen yhdeksäntoista näytepistettä. Maaperänäytteistä on tutkimuslinjan keskiosan lähetyviltä mitattu pieniä kuparipitoisuuksia. Siksi Kelontekemän tärkein etsintäkohde tutkimuksessa on kupari, ja myös lyijystä on havaittu alueella pitoisuuksia.

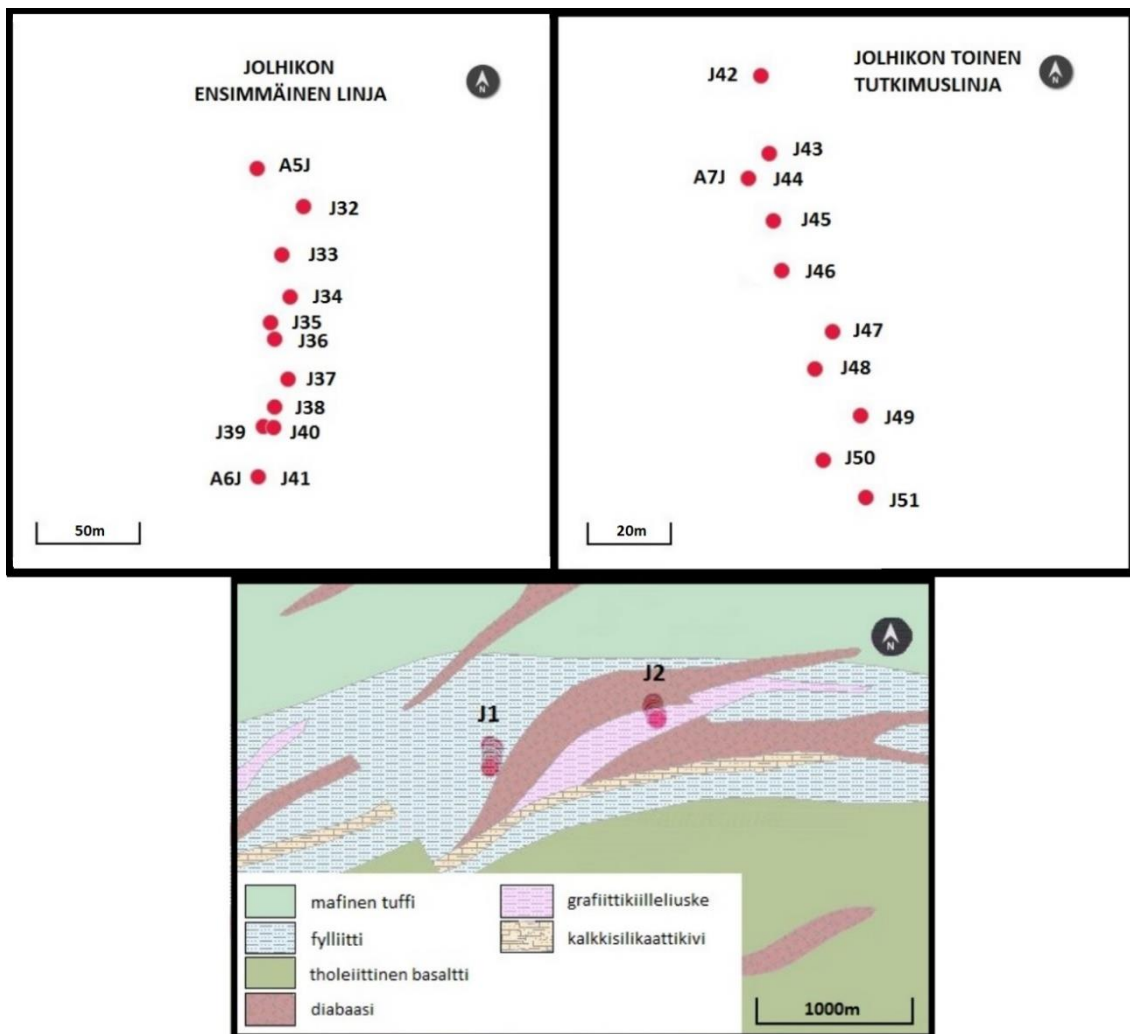


Kuva 4 a.-b. Kelontekemän tutkimuslinja (K) ja linjan sijoittuminen kallioperäkartalla. (Maanmittauslaitos ja GTK)

2.4. Jolhikko

Jolhikon tutkimusalue sijaitsee neljätoista kilometriä kaakkoon vanhasta Saattoporan kupari-kultakaivoksesta, joka oli toiminnassa vajaat kymmenen vuotta 1990-luvun taitteessa (Eilu et al. 2007). Geokaasututkimuksessa Jolhikko edustaa kuitenkin tausta-alueetta, sillä malminetsinnän kannalta Jolhikon kallioperä on todettu tyhjäksi. Alueelta on havaittu vain sinkki- ja kromianoliat sekä vähäisiä pitoisuuksia koboltista ja kuparista.

Jolhikon ensimmäinen tutkimuslinja (J1) kulkee seuraillen linjaa, jolta maaperänäytteistä on mitattu vähäisiä kuparipitoisuuksia. Toisen linjan (J2) ympäristö on aiemmin tutkimatonta, ja linja sijoittuu ensimmäisestä linjasta noin kilometrin itään. Molemmilta linjoilta näytteitä kerättiin kymmenen kappaletta. Jolhikon tutkimuslinjat on havainnollistettu Kuvassa 5 a.-c.



Kuva 5 a.-c. Jolhikon tutkimuslinjat ja niiden sijoittuminen kallioperäkartalla. (Maanmittauslaitos ja GTK)

3. TUTKIMUSMENETELMÄ JA NÄYTTEET

3.1. Tutkimusmenetelmä ja näytteenotto

Tutkimusta varten rakennettiin Wang et al. (2008) mukaillen aktiivinen geokaasunkeräin, joka koostuu virtalähteenä toimivasta akusta, kuivausaineputkesta, kuplituspesästä ja näytteenottopäänä toimivasta minipietsometristä (Kuva 6). Kuivausaineena toimi kemikaali nimeltä Sicapent, jonka tarkoituksena oli estää happohöyryjen kulkeutuminen imupumpun mekanismeihin ja pidentää siten akun käyttöikää. Kaasunkeräin kulki näytteenottokierroksen laatikossa, joka oli varattu ainoastaan keräimelle ja puhtaiden, happopestyjen pipetinkärkien pussille. Näytteen imemisen ajan toki myös näytepullon korkki oli laatikossa säilössä omassa puhtaassa pussissaan.



Kuva 6. Geokaasunkeräin maastolaatikossaan.

Näytteenotto tapahtui tutkimuspaikoilla ennalta suunniteltua näytteenottolinjaa seurailleen. Jokainen näyte on kerätty kolmen kahden minuutin pituisen imun aikana samalta näytepisteeltä mutta eri rei'istä. Hannukaisen ensimmäinen näyte H1 on kerätty kolmesta vierekkäisestä kuopasta ja toinen näyte H2 taas on kolmesta osin toisiaan leikkaavasta kuopasta, minkä jälkeen näytteenottokuoppien muoto vakiintui yhtenäiseksi pitkulaiseksi, noin metrin pituiseksi suorakulmioksi. Näytekuopat ulottuivat maannoksen alarajaan asti, mistä poikkeuksen muodostavat Hannukaisen näytepisteet H10 ja H11, joilla näytteet on imetty suoraan ojan pohjaan tehdyistä rei'istä.

Näytteiden keruu tapahtui 25 cm maannoksen rajan alapuolelta. Mittaviivalla merkitty alumiinikanki hakattiin vasaralla oikeaan syvyyteen ja kankea huojutettiin muutama kerta maan hakkaamisesta aiheutuneen tiivistymisen vähentämiseksi. Näytteenottopäänä toimiva minipietsometri työnnettiin kuopan pohjalle välittömästi, ja kuopan suu tilkittiin letkun ympäriltä tiiviiksi lähistöltä haetulla luonnonsavella. Näin laitteiston imun kohdistuminen geokaasujen sijasta ilmaan estyi.

Ennen jokaista näytettä kuplituspesän kannessa kiinni oleva pipetinkärki vaihdettiin ja uusi näytepullo asetettiin tukevasti kuplituspesään (Kuva 7). Niin käytettävät näytepullot, pipetinkärjet kuin välikorkitkin olivat happopestyjä ja jo laboratoriossa valmiiksi erillisiin pieniin minigrip-pusseihin suljettuja, jotta hivenanalyysin vaatima puhtaus säilyisi maastossa. Minipietsometri ja siihen yhteydessä oleva ohut pitkä letku vaihdettiin myös puhtaiksi jokaisen näytteen välillä. Letkujen liitokset oli tiivistetty teippauksin, ja ennen jokaista imua kaikki liitokset tarkastettiin.



Kuva 7. Lähikuva näytepesästä, joka on tuettu ulkoa puukehikolla ja sisältä paperilla tukevaksi. Kanteen on kiinnitetty pipetinkärki, josta letkua pitkin tuleva kaasu kuplitetaan happoon.

Kontaminaatioriskien hallitsemiseksi näytteenotossa kaksi henkilöä huolehti näytteenottolaitteesta ja -välineistä (Kuva 8) ja toiset kaksi suorittivat näytepaikkojen paikantamisen, kuoppien kaivamisen ja kangen ja saven käsittelyn. Työnjako oli välttämätön, koska ennen näytteidenkeruun aloittamista käytettävien välineiden hivenainepitoisuuksia selvitettiin pikaskannerilla ja lieviä pitoisuuksia kiinnostuksen kohteena olevista hivenmetalleista löytyi esimerkiksi lapiosta, teipistä ja saven käsittelyyn varatuista työhansikkaista.



Kuva 8. Maastossa kaksi henkilöä huolehti ainoastaan näytteenottolaitteistosta ja näytteiden keräämisestä. Kuvassa näytteenotto on parhaillaan käynnissä. (Kuva Veli-Pekka Salonen)

Vain yksi näytteenottaja käsitteli näytteitä ja laitteiston kuplituspesää ja valmisteli laitteiston imuja varten puhtaita kumihansikkaita käyttäen. Toinen näytteenottaja huolehti mukana kulkevasta tarvikelaatikosta, jossa näytepullot olivat suojassa pienessä kylmälaatikossa ja puhtaat ja käytetyt minipietsometrit letkuineen omissa pusseissaan. Toisen näytteenottajan tehtäviin kuului näytepaikkojen muistiin kirjaaminen,

näytteenottoletkun vaihtaminen ja teippaaminen, ajanotto, näytepullojen merkintätarrojen kirjoittaminen ja tuplapussittamisessa avustaminen ennen kerätyn näytteen kylmälaatikkoon säilömistä.

3.2 Geokaasunäytteet ja analysointi

Näytteiden keruu suoritettiin kolmena peräkkäisenä päivänä elokuun 2011 alussa. Näytteet otettiin päivittäin aamu- ja iltapäivän kuluessa, eikä säätilassa tapahtunut mainittavia muutoksia kyseisellä aikavälillä. Ilmanpaineen vaihtelut eivät siten vaikuta merkittävästi tuloksiin. Varsinaisia kaasunäytteitä kerättiin yhteensä 51 kpl, ilmanäytteitä 7 kpl ja nollanäytteitä 10 kpl. Tässä pro gradussa alkuperäiset näytenumerot on korvattu uudella nimikoinnilla esittämisen selkeyttämiseksi (Taulukko 1).

Taulukko 1. Kerätyt näytteet maastotietoineen ja tässä pro gradussa käytetyt näytepisteiden uudet nimikkeet.

Tutkimuspaikka	Näyte	Uusi nimike	X (KKJ2)	Y (KKJ2)	Maannos (cm)	Imuaika (min)	Imukerrat	Lisätiedot
HANNUKAINEN	2.	H1	2499059	7496898	25	2	3	erilliset kuopat
	3.	A1H	2499074	7496883		6	1	ilmanäyte
	4.	H2	2499074	7496883	30	2	3	leikkaavat kuopat
	5.	H3	2499093	7496876	50	2	3	pitkänomainen kuoppa (=pk)
	6.	H4	2499138	7496863	35	2	3	pk
	7.	H5	2499160	7496860	30	2	3	pk
	8.	H6	2499183	7496854	25	2	3	pk
	9.	H7	2499217	7496849	22	2	3	pk
	10.	H8	2499231	7496848	23	2	3	pk
	11.	H9	2499230	7496864	20	2	3	pk
	12.	H11	2499291	7496877	120	2	3	pk, ojanpohja
	13.	H10	2499279	7496875	140	6	1	ei kuoppaa, ojanpohja
	14.	A2H	2499324	7496895		6	1	ilmanäyte
	15.	H12	2499324	7496900	15	2	3	pk
KELONTEKEMÄ	16.	A3K	2559310	7496936		6	1	ilmanäyte
	17.	K13	2559310	7496936	5-10	2	3	pk
	18.	K14	2559321	7496920	5-10	2	3	pk
	19.	K15	2559337	7496906	5-10	2	3	pk
	20.	K16	2559343	7496888	5-10	2	3	pk
	21.	K17	2559356	7496870	5-10	2	3	pk
	22.	K18	2559360	7496850	5	2	3	pk
	23.	K19	2559375	7496837	5-10	2	3	pk
	24.							ei näytettä
	25.							ei näytettä

	26.	K20	2559384	7496815	5-10	2	3	pk
	27.	K21	2559373	7496813	5-10	2	3	pk
	28.	K22	2559392	7496798	5-10	2	3	pk
	29.	K23	2559393	7496788	5	2	3	pk
	30.	K24	2559397	7496778	5-10	2	3	pk
	31.	K25	2559412	7496761	5	2	3	pk
	32.	K26	2559403	7496755	5	2	3	pk
	33.	K27	2559410	7496749	5	2	3	pk
	34.	K28	2559417	7496743	5	2	3	pk
	35.	K29	2559426	7496715	5	2	3	pk
	36.	K30	2559441	7496701	5	2	3	pk
	37.	A4K	2559456	7496680		6	1	ilmanäyte
	38.	K31	2559456	7496680	5	2	3	pk
JOLHIKKO 1	39.	A5J	2528484	7512782		6	1	ilmanäyte
	40.	J32	2528507	7512764	<5	2	3	pk
	41.	J33	2528498	7512741	<5	2	3	pk
	42.	J34	2528503	7512720	<5	2	3	pk
	43.	J35	2528494	7512707	5	2	3	pk
	44.	J36	2528496	7512699	<5	2	3	pk
	45.	J37	2528504	7512680	<5	2	3	pk
	46.							nollanäyte
	47.	J38	2528499	7512667	<5	2	3	pk
	48.	J39	2528493	7512656	<5	2	3	pk
	49.	J40	2528496	7512656	5	2	3	pk
	50.	A6J	2528492	7512632		6	1	ilmanäyte
	51.	J41	2528492	7512632	<5	2	3	pk
JOLHIKKO 2	52.	J42	2529513	7513101	5	2	3	pk
	53.	J43	2529516	7513083	5	2	3	pk
	54.							nollanäyte
	55.	A7J	2529512	7513076		6	1	ilmanäyte
	56.	J44	2529512	7513076	<5	2	3	pk
	57.	J45	2529518	7513067	5	2	3	pk
	58.	J46	2529521	7513055	5	2	3	pk
	59.	J47	2529533	7513040	5	2	3	pk
	60.	J48	2629530	7513031	5	2	3	pk
	61.	J49	2529541	7513021	5	2	3	pk
	62.	J50	2529533	7513009	5-10	2	3	pk
	63.	J51	2529543	7513001	20	2	3	pk

Laboratoriohenkilökunta analysoi näytteet Helsingin yliopiston Kumpulan kampuksen ympäristögeokemian laboratoriossa syys–joulukuussa 2011. Analysointiin asti näytteet olivat koskemattomina kylmälaukussaan kylmiöön varastoituina. Analysointi suoritettiin plasmaemissio-massaspektrometrillä (ICP-MS), joka on osoittautunut kiinalaisissa tutkimuksissa lyömättömäksi geokaasujen mittaamisessa muihin analyysimenetelmiin verrattuna (Wang et al. 2008). Kyseisen analyysilaitteen mittausherkkyyks on merkittävä,

mitta-alue on laaja ja laitteen reaktio/törmäyskammio poistaa mittaushäiriöitä tehokkaasti. 5-prosenttiseen typpihappoon kuplitetut kaasunäytteet voitiin analysoida laitteella suoraan ilman esikäsittelyvaiheita.

3.2.1. Tulosten muuttaminen kaasupitoisuuksiksi

ICP-MS:n mittaamat arvot ovat näytteiden hivenmetallipitoisuuksia nestetilavuudessa ($\mu\text{g/l}$). Tulosten muuttaminen kaasupitoisuuksiksi onnistuu suhdeluvun avulla, joka on laskettu seuraavasti:

Näytteenotossa alipainepumppauksen nopeus oli 500 ml/min. Kukin näytepullo sisältää 25 ml 5-prosenttista typpihappoa, johon kuplitettiin 3 x 2 min kaasua. Hapon kautta kulki näin ollen 3000 ml kaasua. Mitattu pitoisuus voidaan suhteuttaa kaasupitoisuudeksi jakamalla hapon massa kaasumäärän massalla ja kertomalla sitten mitattu pitoisuus saadulla suhdeluvulla. Massa saadaan laskettua kertomalla tiheys tilavuudella. Koska näytteet otettiin läheltä maanpintaa ja maa on huokoista, voidaan kaasun tiheyden olettaa vastaavan ilman tiheyttä $1,225 \text{ kg/m}^3$. 5-prosenttisen typpihapon tiheys taas on $1,02563 \text{ kg/l}$.

$$\text{Suhdeluku} = (25\text{ml} \times 1,02563 \text{ g/cm}^3) / (3000\text{ml} \times 0,001225 \text{ g/cm}^3) = 6,97707$$

4. TULOKSET

4.1. Nolla- ja ilmanäytteet

Tämän tutkimuksen nollanäytteet kulkivat varsinaisten näytteiden mukana laboratorion tutkimuspaikoille ja takaisin ja odottivat analysointia kylmiössä näytteiden kanssa. Lapissa näytepullot avattiin, asetettiin hetkeksi kuplituspesään näytteenottotilannetta jäljitellen puhdas pipetinkärki kuplituspesän kannessa, suljettiin ja säilöttiin pusseihinsa. Imuajan pituista aikaa ei odotettu, vaan nollanäytteiden pullot olivat auki vain lyhyen hetken. Nollanäytteiden tulostaulukko on esitetty Liitteessä 1.

Nollanäytteiden keskiarvot määrittävät lopulta kaasunäytteiden pitoisuudet, sillä kyseiset keskiarvot vähennetään kaikista mitatuista arvoista näytteiden kuljetuksen, käsittelyn ja säilömistä aiheuttaman häiriön poistamiseksi. Tässä tutkielmassa esitetyt tulokset ovat arvoja, joista nollanäytteiden keskiarvot on vähennetty. Pienet nollanäytteiden arvot osoittavat, että näytteiden kontaminoitumisriski on hallittu näytteenoton kuluessa hyvin. Tämän tutkimuksen nollanäytteissä suurin osa alkuaineista jäi alle määritysrajan ja rajan ylittävät pitoisuudet olivat pieniä (Taulukko 2).

Taulukko 2. Tutkimuksen nollanäytteiden tunnusluvut.

Nollanäytteet (n=10) ng/ml nestetilavuudessa										
	Cr	Fe	Co	Ni	As	Hg	Pb	U	Cu	Zn
Keskiarvo	0,246	7,95	–	–	–	–	0,071	0,0017	–	–
Keskihajonta	0,112	5,25	–	–	–	–	0,011	0,0007	–	–
Mediaani	0,239	7,66	–	–	–	–	0,069	0,0017	–	–
Määritysraja	0,124	0,200	0,011	0,109	0,024	0,018	0,011	0	0,178	0,935

Varsinaisten kaasunäytteiden lisäksi tutkimuksessa kerättiin tilannekuvan parantamiseksi ja menetelmän testaamiseksi muutamia ilmanäytteitä. Näytteenotto noudatti samaa kaavaa kuin tavallisten näytteiden kanssa, mutta kuoppaan viemisen sijaan letkun päätä kannateltiin puoli metriä maanpinnan yläpuolella. Puolta tutkituista alkuaineista ei esiintynyt ilmanäytteissä ollenkaan, uraanipitoisuuksia taas löytyi eniten. Vertailun helpottamiseksi Taulukossa 3 on esitetty ilmanäytteiden tunnusluvut kaasutilavuudessa. Jos ilmanäytteistä tarkastellaan poikkeuksellisesti myös nollanäytteiden keskiarvoilla korjaamattomia arvoja, on arvoissa tällöin havaittavissa selvää alueellista vaihtelua etenkin kromin, lyijyn ja uraanin osalta.

Taulukko 3. Ilmanäytteiden mitatut pitoisuudet eri tutkimusalueilla.

Havaitut pitoisuusarvot ilmanäytteissä (n=7) ng/ml nestetilavuudessa					
	Hg	Pb	U	Zn	Fe
Hannukainen	0,118	0,254	0,0033	3,08	
Kelontekemä				12,08	
Jolhikko yksi		0,081	0,0028	49,05	10,8
			0,0025		
Jolhikko kaksi			0,0022		
Kaasutilavuudessa ng/L					
keskiarvo		1168,7	18,8	151053	
hajonta		853,5	3,3	169010	

4.2. Kokonaistulokset ja tulosjakauma alueiden välillä

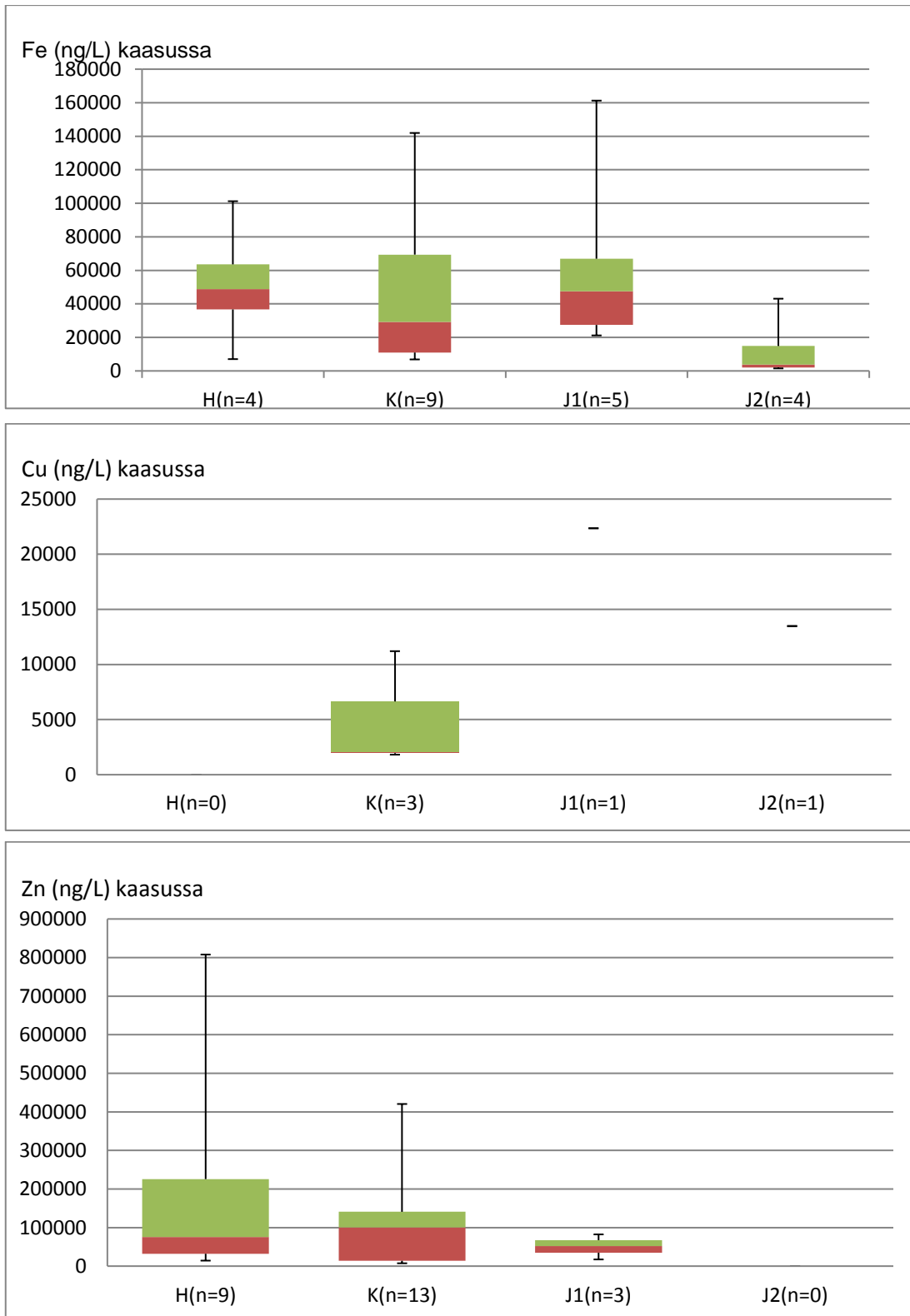
Tämän tutkimuksen tulostaulukko on esitetty Liitteessä 2. Määritysrajan alle jääviä mittaustuloksia on paljon lukuun ottamatta uraania ja lyijyä, ja tulosten tunnuslukutaulukko osoittaa merkittävää pitoisuusvaihtelua näytteiden välillä (Taulukko 4). Tulosten esityksessä on siksi keskitytty tarkastelemaan havaittujen pitoisuuksien kokonaiskuvaa muistaen, että paitsi tutkimusalueiden välillä myös tutkimusalueiden sisällä luontaiset pitoisuusvaihtelut voivat olla suuria. Geokaasujen etuna on, ettei anomalioiden havaitsemiseen tarvita välttämättä suuria pitoisuuksia, kunhan anomalia piirtyy esiin selvästi.

Taulukko 4. Tutkimuksen kaikki näytepisteet huomioiva tunnuslukutaulukko.

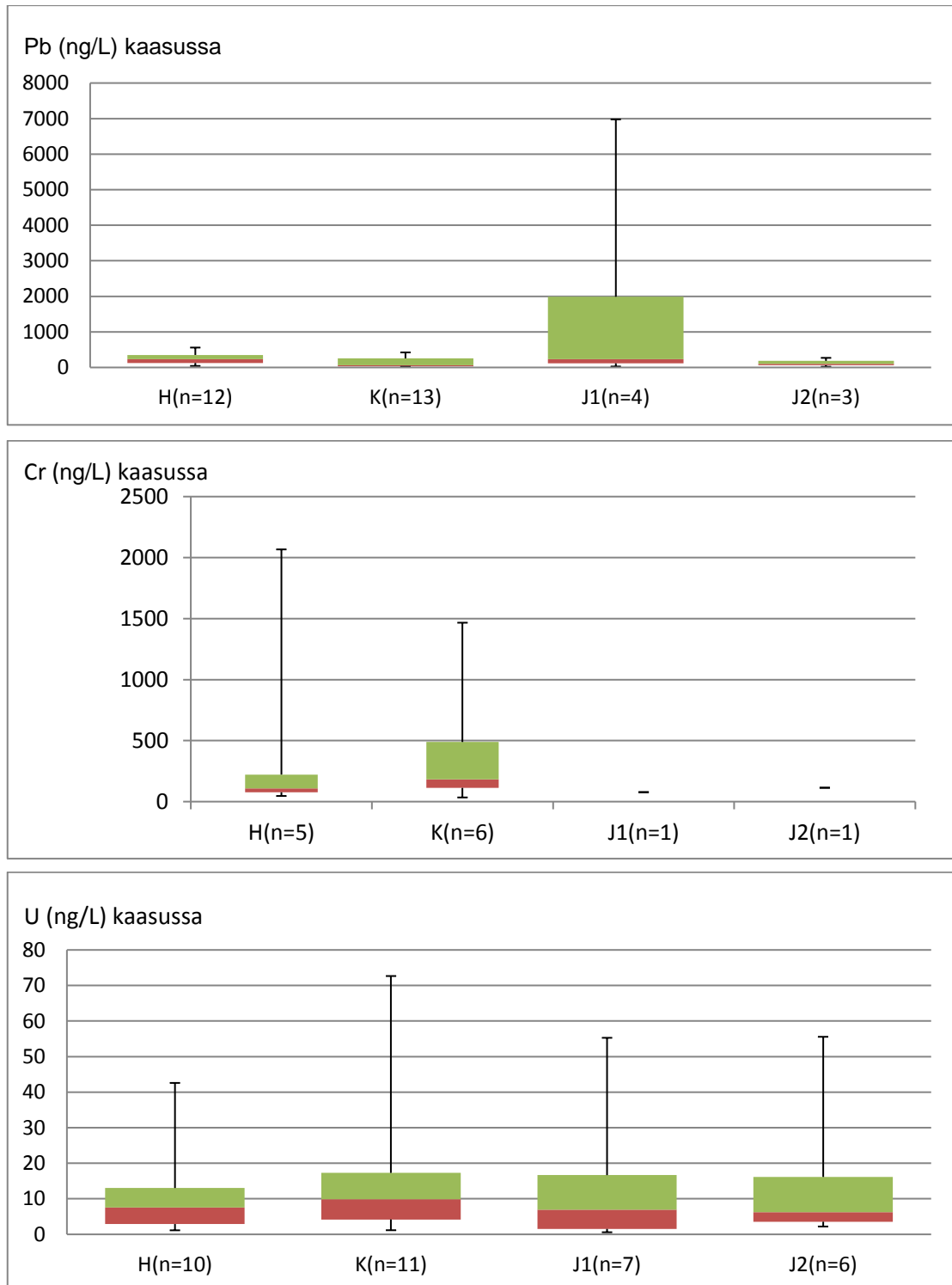
Näytteet (n=51) ng/ml nestetilavuudessa					
alkuaine	keskiarvo	keskihajonta	mediaani	variaatiokerroin%	% alle määritysrajan/ ei pitoisuutta*
As	0	0	0	0	100
Co	0	0	0	73,6	98
Cr	0,110	0,132	0,031	119,6	74,5
Cu	0,1833	0,5497	0,0445	299,9	90,2
Fe	6,3	8,3	0,1	132,0	56,9
Hg	0,0049	0,0029	0,0045	59,0	98
Ni	0	0	0	68,7	98
Pb	0,067	0,048	0,077	70,9	37,3
U	0,0027	0,0028	0,0022	102,8	33,3
Zn	9,54	20,239	0,23	212,1	51

*(mitattu arvo – nollanäytteiden ka = pitoisuus)

Kaasumittauksissa arseenista ei saatu pitoisuuksia miltään alueelta. Myös nikkeliä, koboltia ja elohopeaa oli kaasunäytteissä niukasti. Tutkimuksen ainoa nikkelpitoisuus löytyi Hannukaisesta, ainoa elohopeapitoisuus Jolhikon tutkimuslinjalta yksi ja kromipitoisuus Jolhikon tutkimuslinjalta kaksi. Kaasupitoisuuksien jakautumista eri alueilla alkuaineittain on muiden tutkittujen metallien osalta havainnollistettu Kuvissa 9 a.-f.



Kuva 9 a.-c. Mitattujen kaasupitoisuuksien jakaumat Hannukaisen(H), Kelontekemän(K) ja Jolhikon ensimmäisen(J1) ja toisen(J2) tutkimuslinjan näytteistä.



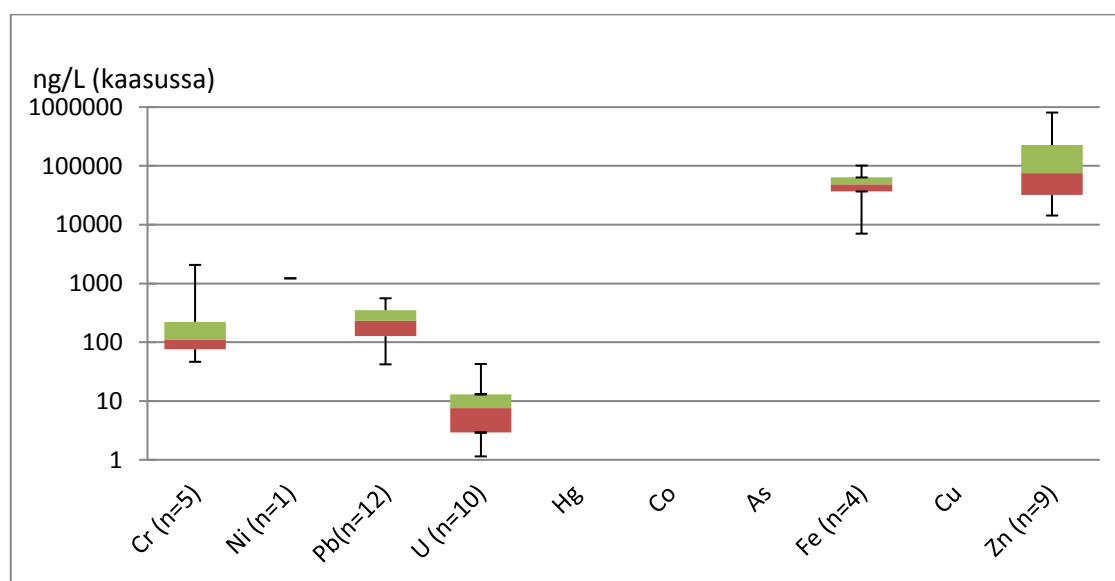
Kuva 9 d.-f. Mitattujen kaasupitoisuuksien jakaumat Hannukaisen, Kelontekemän ja Jolhikon ensimmäisen ja toisen tutkimuslinjan näytteistä.

Rautaa on tulosten valossa alueista eniten Hannukaisessa ja havaittavissa määrin myös Jolhikon ensimmäisellä tutkimuslinjalla. Jolhikon tutkimuslinjalla kaksi rautaa on vähän. Kuparia oli kaikkiaan vain viidessä näytteessä, joista kolme on Kelontekemästä.

Sinkkipitoisuuksia tavattiin runsaasti sekä Hannukaisesta että Kelontekemästä, Jolhikosta taas tuskin lainkaan. Lyijypitoisuuksia oli määrällisesti paljon, mutta lyijyn pitoisuudet ovat pieniä. Kromia oli eniten Hannukaisessa ja Kelontekemässä. Uraaninpitoisuudet ovat hyvin samankaltaiset kaikilla alueilla.

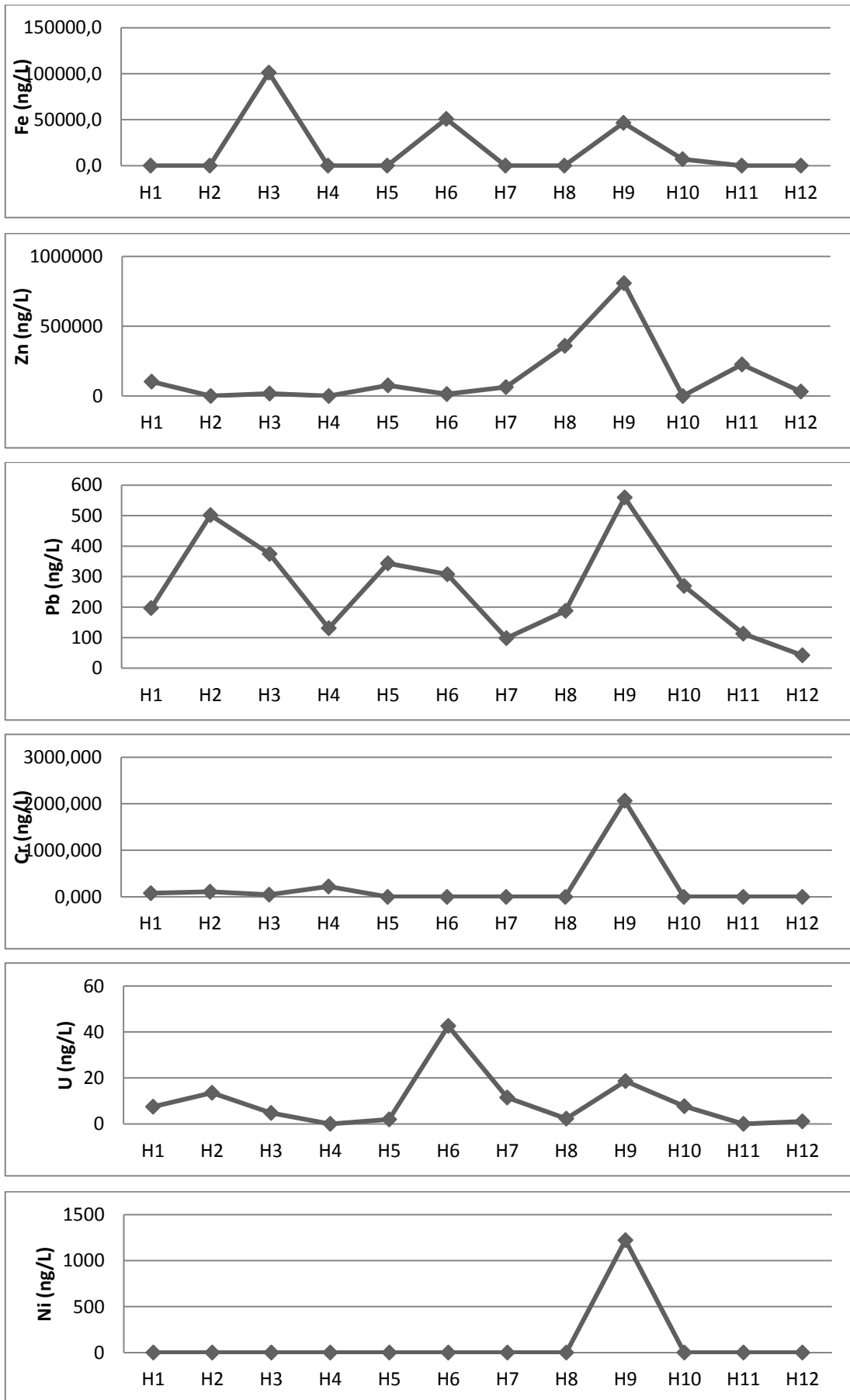
4.3. Hannukainen

Yhdestäkään Hannukaisen kaikkiaan kahdestatoista kaasunäytteestä ei mitattu kuparipitoisuuksia. Rauta- ja sinkkipitoisuudet ovat alueella selvästi koholla ja kromia ja lyijyä esiintyy pienemmissä määrin. Tutkimuksen ainoa mitattu nikkelipitoisuus on samaa suuruusluokkaa kromin ja lyijyn pitoisuuksien kanssa. Alkuaineiden jakauma Hannukaisessa ja pitoisuuksia antaneiden näytteiden lukumäärät on esitetty Kuvassa 10.



Kuva 10. Havaittujen kaasupitoisuuksien jakauma Hannukaisessa.

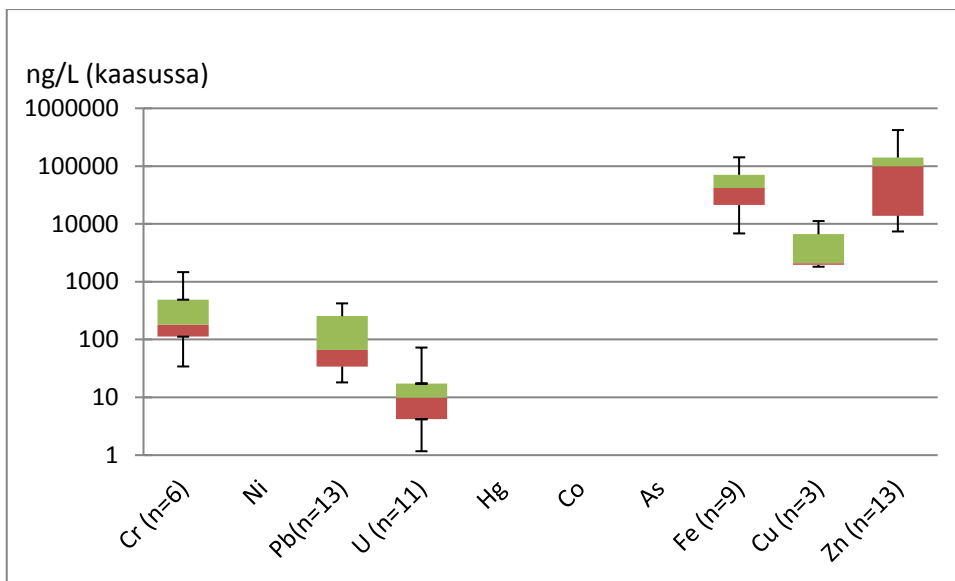
Anomalioiden havaitsemisen kannalta näytelinjojen profiilit ovat tärkeässä osassa. Profiilit Hannukaisen näytelinjasta piirtävät esiin yhden selvästi anomalian pisteen H9 näytteen kohdalla (Kuva 11 a.-f.). Tutkimuksen ainoa mitattu nikkelipitoisuus 1222 ng/L asettuu samaan pisteeseen. Näytepisteissä H3 ja H6 raudan ja lyijyn pitoisuudet näyttävät myös korreloivan keskenään aiheuttaen profiiliin pitoisuuspiikin.



Kuva 11 a.-f. Hannukaisen näytelinjan kaasuprofiilit.

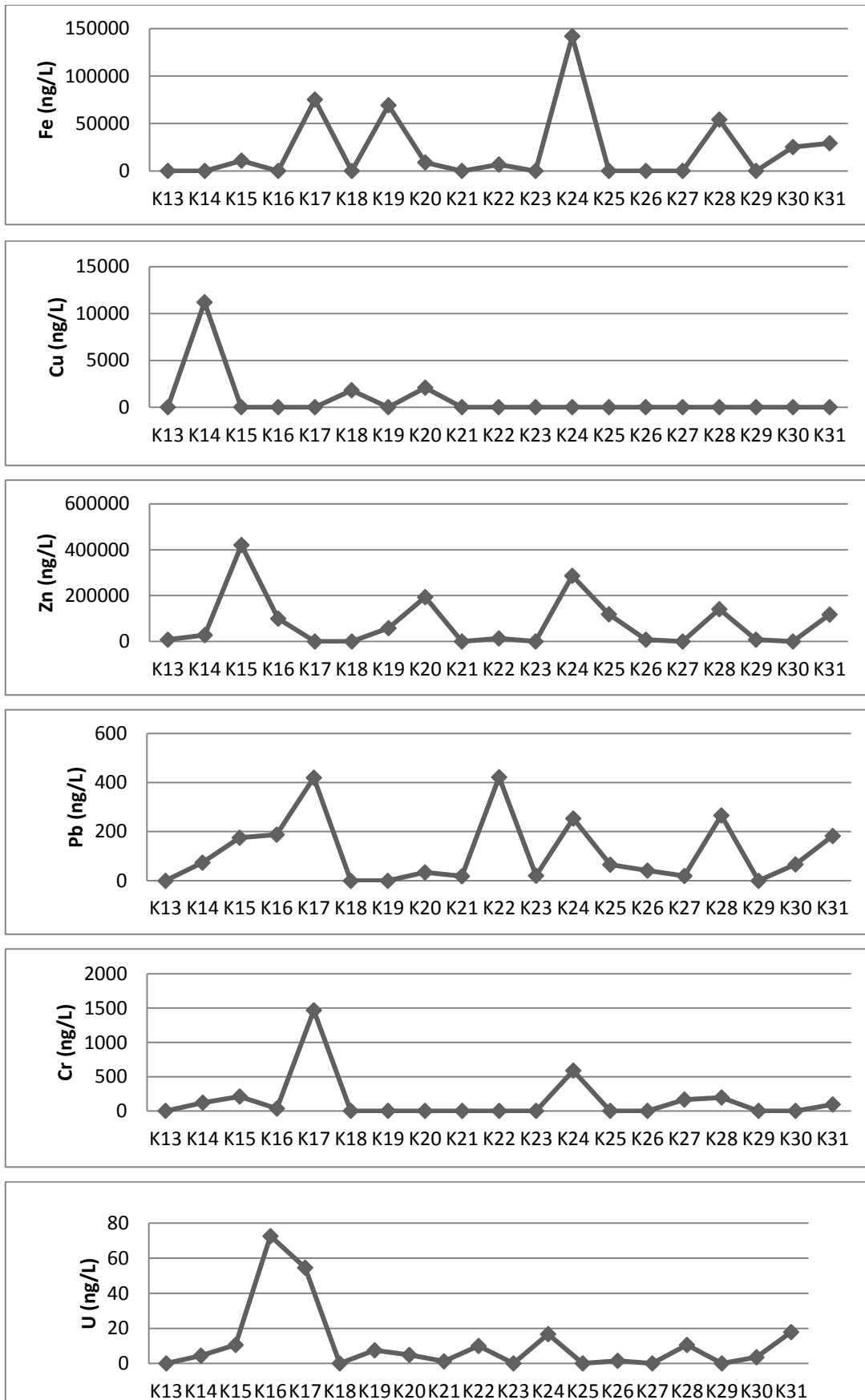
4.4. Kelontekemä

Kelontekemässä kaasutulosten jakauma on samankaltainen kuin Hannukaisessa, mutta pitoisuudet ovat pienempiä. Kuva 12 Kelontekemän jakaumasta osoittaa raudan, kuparin ja sinkin osalta kohonneita pitoisuuksia. Kuparipitoisuuksia oli kolmessa näytteessä keskenään samaa suuruusluokkaa olevina pitoisuuksina. Myös kromin ja lyijyn pitoisuudet olivat alueella maltillisesti koholla.



Kuva 12. Havaittujen kaasupitoisuuksien jakauma Kelontekemässä.

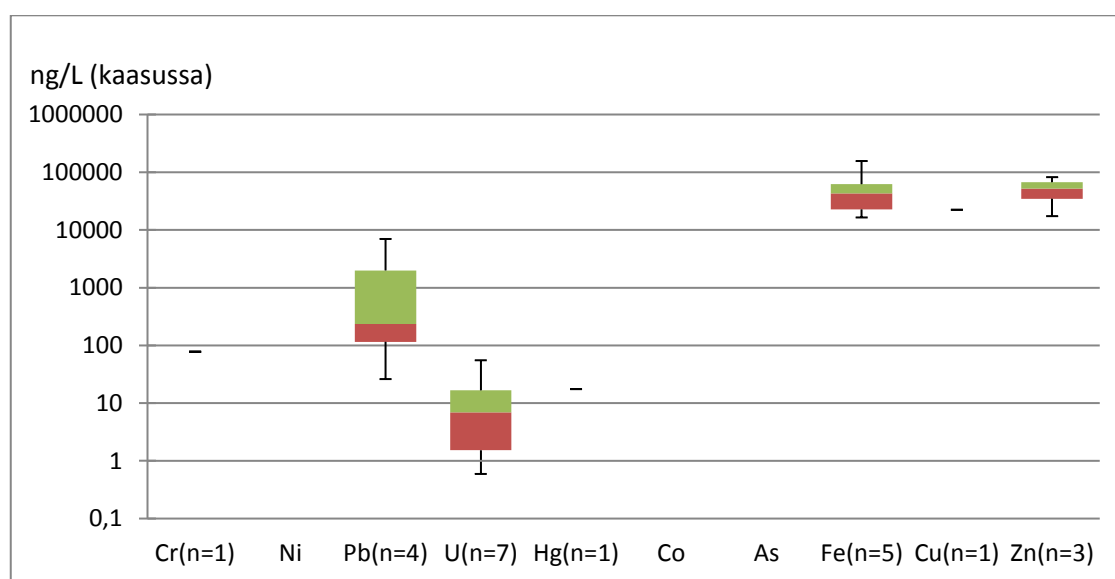
Kelontekemän profiilien vertailu on esitetty Kuvassa 13 a.-f. Profiilit ilmaisevat, että sisäistä pitoisuusvaihtelua on Kelontekemän alueella paljon. Näytepisteessä K24 on kuitenkin nähtävillä anomalistista nousua lyijyn, sinkin, raudan ja kromin osalta, samoin pisteessä K28 mutta pienemmässä määrin. Raudan, lyijyn ja kromin pitoisuudet piirtävät profiiliin korrelatiivisen nousun myös näytepisteen K17 kohdalla.



Kuva 13 a.-f. Kelontekemän näytelinjan kaasuprofiilit.

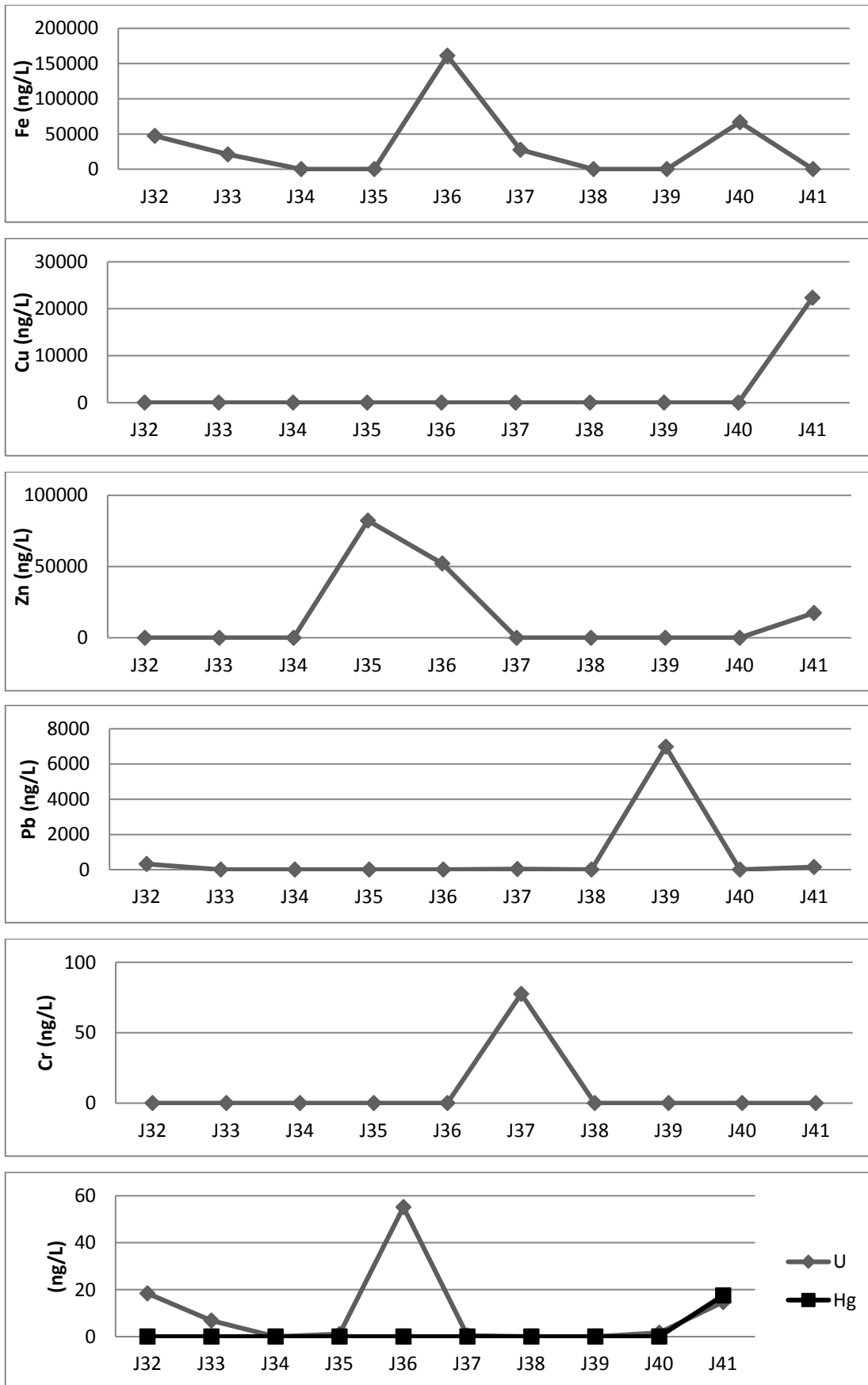
4.5. Jolhikon tutkimuslinja yksi

Jolhikon ensimmäinen linja on varsin köyhä tutkittujen alkuaineiden suhteen, kun tarkastellaan saatujen pitoisuuksien lukumääriä (Kuva 14). Etenkin sinkkiä on mitattu toisiin tutkimusalueisiin verrattuna vähän. Havaitut rauta- ja sinkkipitoisuudet ovat silti samaa suuruusluokkaa esimerkiksi Kelontekemän pitoisuuksien kanssa. Raudan ja sinkin lisäksi alkuaineista vain lyijy ja uraani antavat useampia pitoisuuksia Jolhikon ensimmäisellä tutkimuslinjalla.



Kuva 14. Havaittujen kaasupitoisuuksien jakauma Jolhikon ensimmäisellä tutkimuslinjalla.

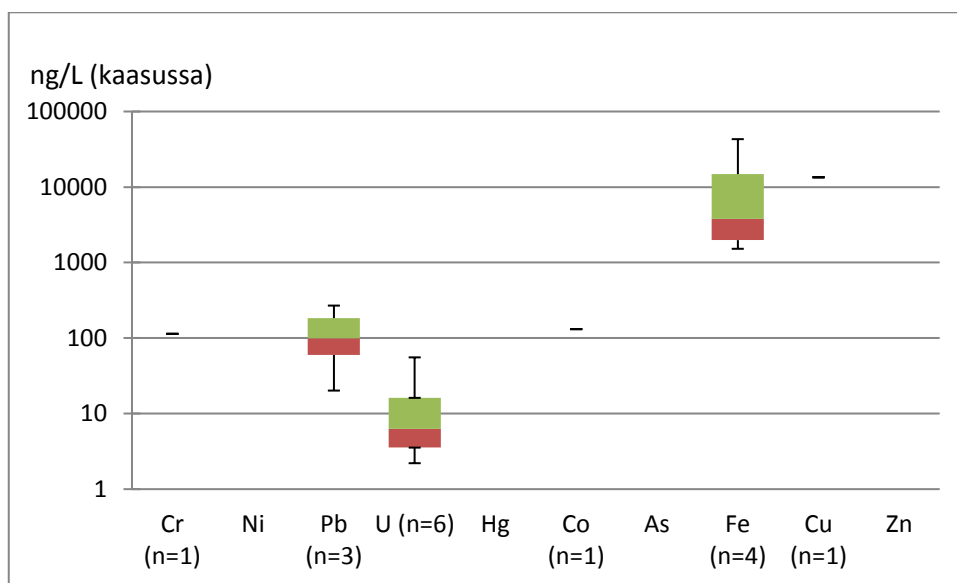
Jolhikon ensimmäisen tutkimuslinjan profiilien vertailu on esitetty kuvassa 15 a.-f. Saatujen pitoisuuksien vähäisen lukumäärän takia profiilit ovat varsin yksinkertaisia eivätkä eri alkuaineiden pitoisuudet korreloi vahvasti missään tietyssä pisteessä. Korkeintaan voidaan todeta, että raudan, sinkin ja uraanin pitoisuudet ovat koholla näytepisteessä J36.



Kuva 15 a.-f. Jolhikon ensimmäisen näytelinjan kaasuprofiilit.

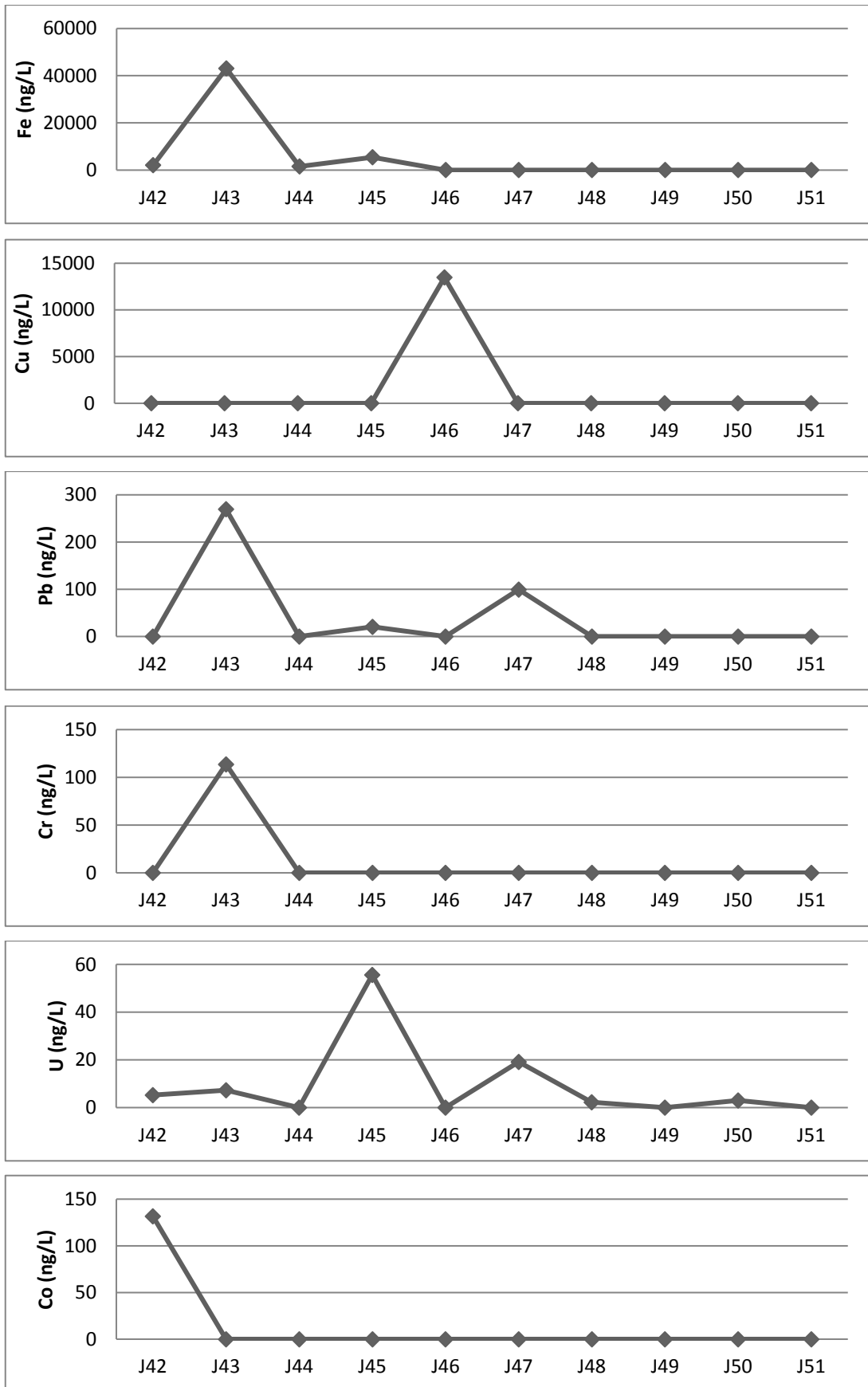
4.6. Jolhikon tutkimuslinja kaksi

Jolhikon toinen tutkimuslinja on ensimmäisen linjan kaltainen siinä, että saatuja pitoisuuksia on varsin vähän. Kuparia ja lyijyä on mitattu muutamia pitoisuuksia, mutta esimerkiksi sinkkiä ei tuloksista löytynyt lainkaan, vaikka muualla se on tullut geokaasuissa hyvin esiin. Sen sijaan Jolhikon toiselta tutkimuslinjalta on mitattu geokaasututkimuksen ainoa kobolttipitoisuus. Jolhikon toisen tutkimuslinjan alkuainejakauma on havainnollistettu Kuvassa 16.



Kuva 16. Havaittujen kaasupitoisuuksien jakauma Jolhikon toisella tutkimuslinjalla.

Kuva 17 a.-f. esittelee Jolhikon toisen tutkimuslinjan pitoisuusprofiilit, joita lukumäärältään vähäiset havainnot jälleen yksinkertaistavat. Tutkimuksen ainoa kobolttipitoisuus on mitattu tutkimuslinjan näytepisteestä J42. Muita alkuainepitoisuuksia kyseisestä pisteestä ei havaittu. Lyijyn ja uraanin pitoisuudet näyttävät seurailevan toisiaan Jolhikon toisella tutkimuslinjalla. Yllättäen näytepisteessä J43 on havaittavissa raudan, lyijyn ja kromin pitoisuuksien keskittymä, johon liittyy myös matala uraanipitoisuuden nousu.



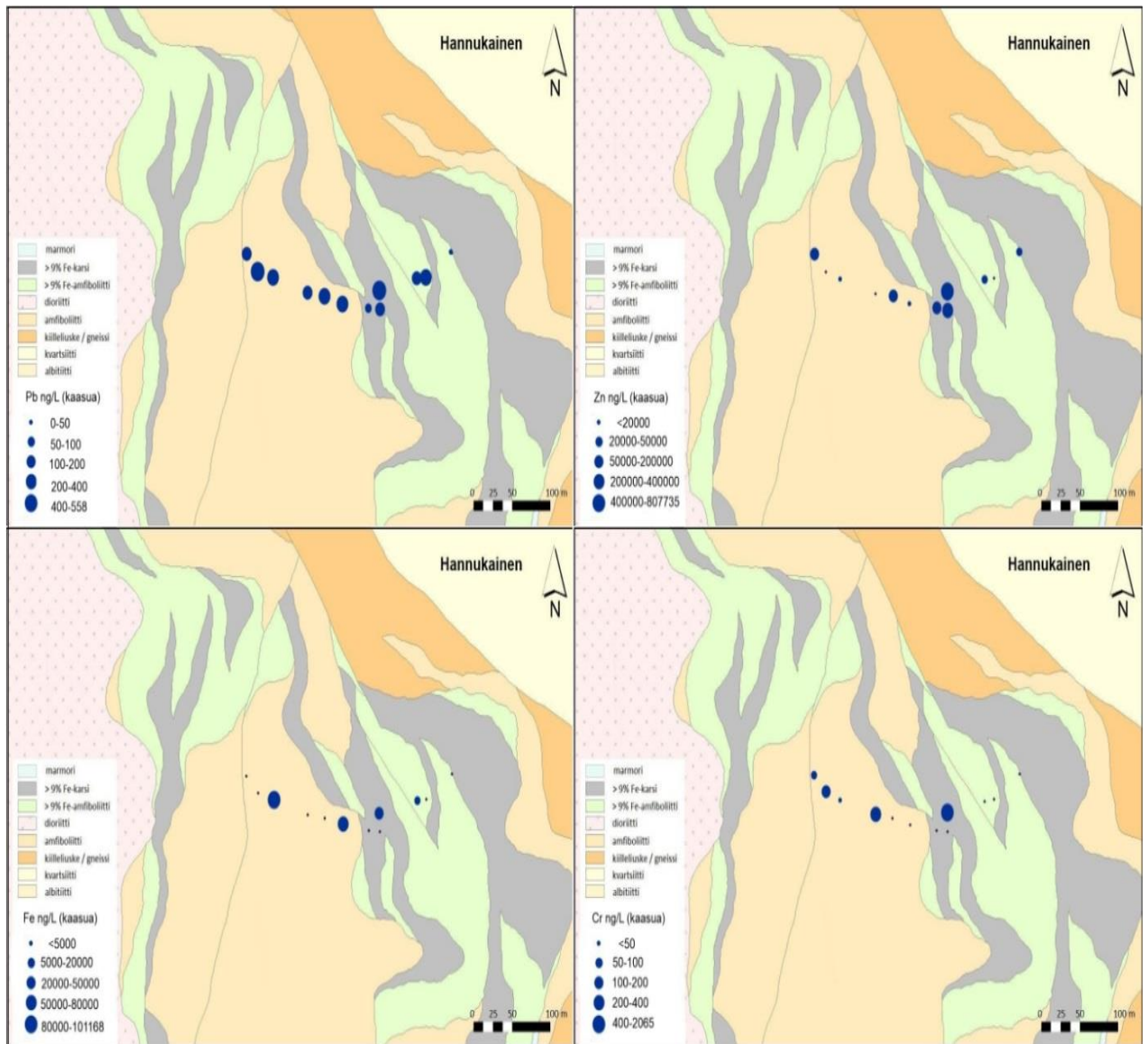
Kuva 17 a.-f. Jolhikon toisen näytelinjan kaasuprofiilit.

5. TULOSTEN TARKASTELU

Laboratorion standardinäytteiden saannot olivat hyviä, joten tutkimuksen tulokset ovat laitteiston osalta luotettavia. Nollanäytteiden arvot olivat myös pieniä ja jäivät puolella mitatuista alkuaineista määritysrajan alle. Nollanäytteiden pienet uraanipitoisuudet johtuvat uraanin luontaisista tausta-arvoista ja matalasta mittausherkkyydestä, joten tulokset ovat edustavia myös näytteenottoa tarkastellen, kun nollanäytteiden keskiarvoa käytetään korjausarvona.

Ilmanäytteet korostavat, että geokaasujen mittausmenetelmä on erittäin herkkä. Esimerkiksi sinkin pitoisuudet ilmanäytteissä olivat suuruudeltaan samaa luokkaa kuin geokaasuista mitatut pitoisuudet. Vaikka kromilla, lyijyllä ja uraanilla oli ilmanäytteiden korjaamattomissa arvoissa selkeä alueellinen pitoisuus, näin ei ole kaikkien alkuaineiden kohdalla, joten kaasumittauksessa olennaista on varmistaa imun maaperän kaasuihin kohdistuminen. Näytteenottajien huolellisuus korostuu kaikessa. Myös laitteiston ja sen materiaalien vaikutusta tuloksiin on syytä pohtia, mutta tässä tutkimuksessa etuna oli, että tutkimuslinjoja oli useita ja erot tutkimuslinjojen välillä selvät. Koska näytteenottajat ja välineet olivat koko ajan samat, välineistön mahdolliset vaikutukset ilmenevät tuloksissa kauttaaltaan ja erot alueiden välillä ovat todellisia.

Yleisesti geokaasututkimuksen tulokset vahvistavat sen, mitä tutkimuslinjoista jo etukäteen tiedettiin. Jolhikon alueella tutkittuja alkuaineita havaitaan kaasunäytteissä vähemmän ja pitoisuudet ovat pienempiä, erityisesti kromin ja sinkin osalta. Hannukaisen ja Kelontekemän laatikkojanakuvaajat ovat samankaltaisia, mutta Hannukaisessa raudan ja sinkin kaasupitoisuudet ovat hieman suurempia, kun taas Kelontekemästä mitattiin kuparipitoisuuksia. Hannukaisen kaasupitoisuuksien profiili osoittaa selvän anomalian näytepisteessä H9, jossa niin raudan, sinkin, lyijyn, kromin, uraanin kuin nikkelin pitoisuudet ovat koholla. Kyseisen kaasunäytteen nikkeliarvo oli tutkimuksen ainoa ja on huomionarvoinen siksi, että nikkeli on hyvä kultamalmin indikaattori. Kuva 18 havainnollistaa tarkemmin Hannukaisen kaasupitoisuuksien sijoittumista kartalla ja osoittaa näytepisteen H9 asettuvan tarkasti rautapitoisen karsimalmin päälle.



Kuva 18. Sinkin, raudan, lyijyn ja kromin pitoisuuskartat Hannukaisen tutkimuslinjalla. Lyijyn kartassa näkyvät tutkimuslinjan kaikki näytepisteet H1-H12 vasemmalta oikealle. (Karttapohja Northland Mines Oy)

Hannukaisessa näytepisteissä H6 ja H3 raudan, lyijyn ja uraanin pitoisuudet olivat koholla. H6 asettuu karsimalmin viereen, mutta H3 on jo selvästi kauempana. Onkin mielenkiintoista, että näytteen H3 kohdalla oli tutkimuksen paksuin maannos 50 cm ja turve oli myös vetisempää kuin muualla, mikä tukee ajatusta, että maaperän vesikylläisyys on anomalian muodostumista vauhdittava tekijä. Hannukaisessa oli Kelontekemään ja Jolhikkoon nähden kokonaisuudessaan paljon paksumpi maannos ja runsaiden hiekka- ja sorakerrostumien ansiosta todennäköisesti parempi vedenjohtokyky, mikä voi selittää eroja Hannukaisen ja Kelontekemän mineralisaatioiden havaitsemisessa.

Hannukaisen lisäksi Kelontekemän kaasuprofiilissa on osin anomalisen oloisia nousuja. Näytepisteissä K17 ja K24 on kaasuista mitattu rautaa, lyijyä, kromia ja uraania ja K24:ssä lisäksi sinkkiä. Toki pitoisuudet ovat Hannukaisen mineralisaation yläpuolelta havaitun anomalian antamiin arvoihin verrattuna pienempiä eikä niihin liity esimerkiksi nikkeli- tai kuparipitoisuuksia. Kelontekemän profiileissa on eniten alueen sisäistä vaihtelua, mikä kertoo geokaasujen hyvästä havainnointikyvystä alueella.

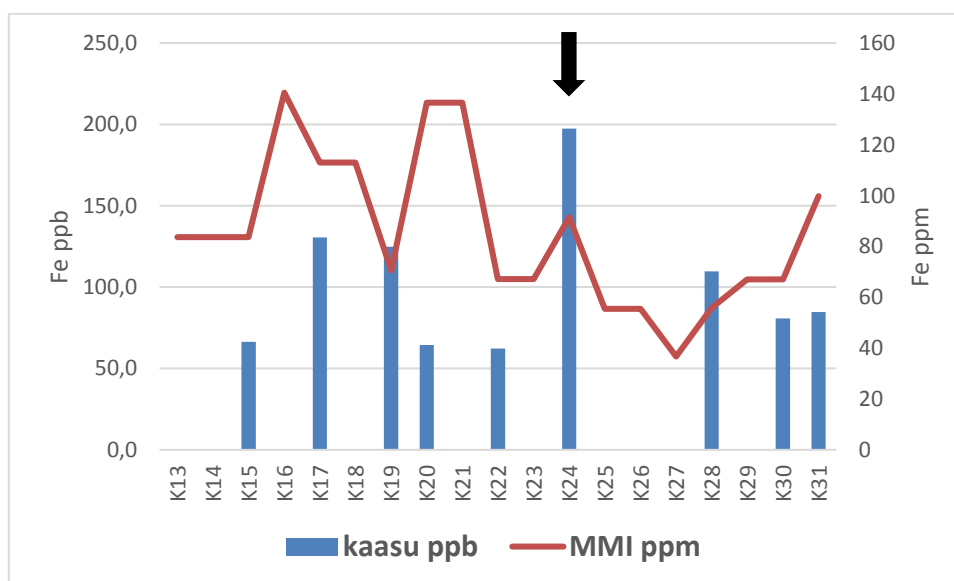
Liitteeseen 3 on koottu Geologisen tutkimuskeskuksen maaperän moreeninäytteistä mittaamia taustapitoisuusarvoja tutkimusalueilta. Taustapitoisuuksista käy selvästi ilmi, että Jolhikko ja Kelontekemä kuuluvat metalli- ja arseeniprovinssihin. Kun tarkastellaan 80 km halkaisijaltaan olevaa aluetta, jonka sisään kaikki kolme tutkimusaluetta mahtuvat, ja verrataan niitä tutkimusalueista kymmenen kilometrin säteeltä mitattuihin moreeninäytteiden pitoisuuksiin, Hannukaisen alueella taustapitoisuuksien keskiarvot ovat keskimäärin puolet ison alueen keskiarvoista. Jolhikon alueen taustapitoisuuksien keskiarvot ovat lähellä ison alueen pitoisuuksia koboltin, kromin, nikkelin ja sinkin osalta, mutta kuparipitoisuudet ovat Jolhikon alueella taustapitoisuuksien mukaan alueista jopa suurimmat. Kelontekemän taustapitoisuusarvot ovat kaikkein suurimmat ja nikkelin ja kromin osalta huomattavan isot.

Taustapitoisuuksien jakauman tuntien Hannukaisen muita tutkimusalueita suuremmat geokaasujen arvot osoittavat malmiutuman rikkauden. Vastaavasti Jolhikon geokaasujen tutkimuslinja on alueellisesti tarkastellen köyhä. Gao et al. (2011) ovat todenneet, että geokaasujen sinkkipitoisuudet voivat nousta jopa kymmeniä tuhansia kertoja suuremmiksi kuin tausta-alueelta mitatut kaasuarvot, mikä näkyy esimerkiksi Hannukaisen anomaliapiikin kohdalla. Valtaosin tämän tutkimuksen alueiden väliset geokaasujen pitoisuuserot eivät ole näin suuria mutta kuitenkin merkittäviä.

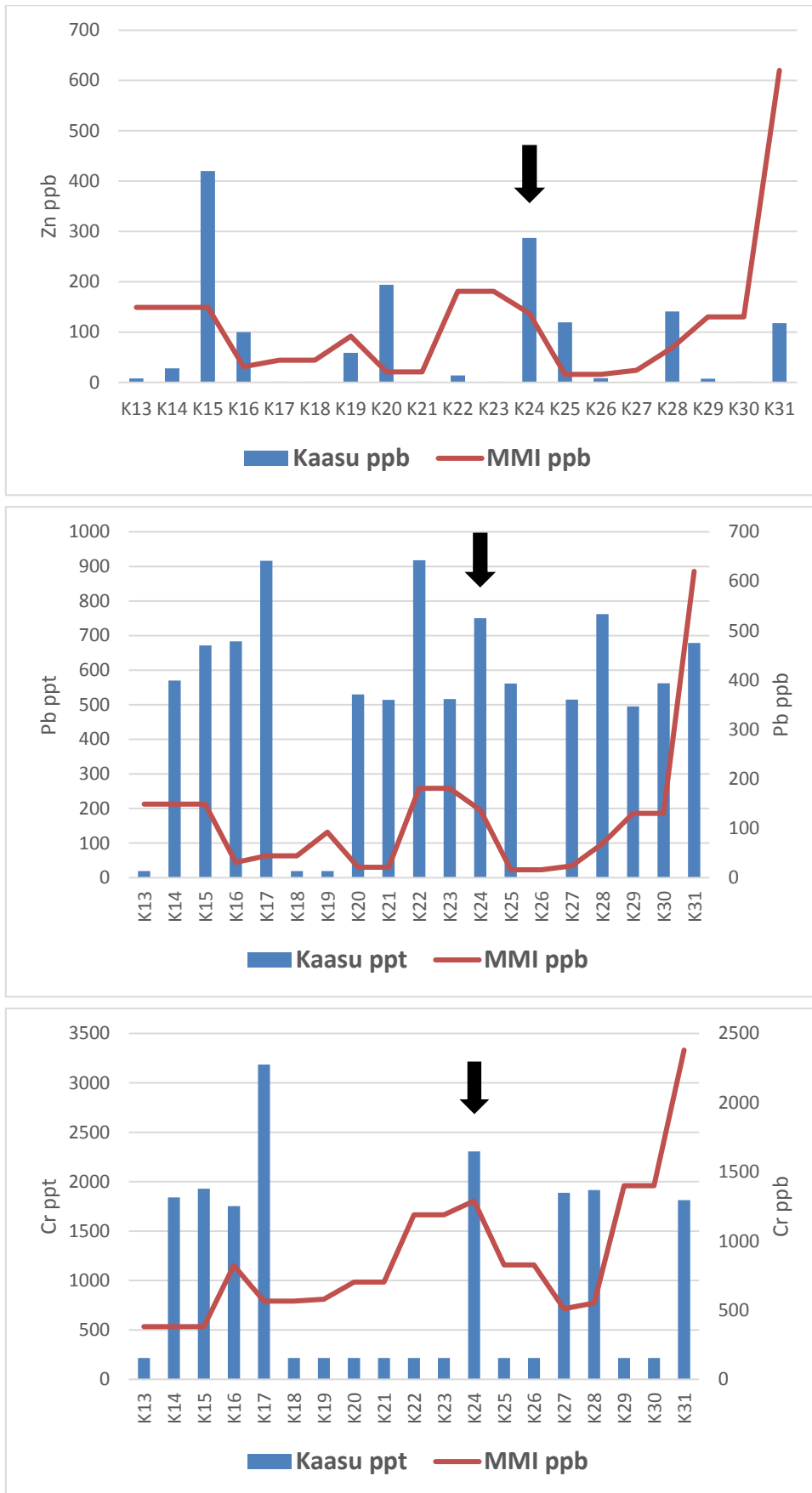
Niirasen (2005) mukaan uraani kuuluu IOCG-malmien mineraaliseurueeseen. Hannukaisen ympäristövaikutusten arviointiselostus kertoo, että kallioperän uraanipitoisuus kaivoksen alueella on keskimäärin 10 mg/kg, kun yleisesti Suomen keskiarvo on 4 mg/kg (Northland 2013). Kaasunäytteissä uraania on myös usein läsnä, mutta uraanin pitoisuusarvot ovat kaikilla tutkimuslinjoilla lähes samansuuruisia ja Kelontekemässä peräti Hannukaista suuremmat. Niiranen (2005) mainitsee myös, että kullan ja kuparin määrät ovat IOCG-malmeissa suhteellisen pieniä, mutta kuparin

näkyminen muiden paitsi Hannukaisen tutkimuslinjoilla edes kerran kiinnittää huomiota. Kaasutulosten valossa toiset alkuaineet ovat kaasuissa useammin edustettuina kuin toiset, ja syynä ovat epäilemättä erilaiset maaperässä vallitsevat olosuhteet. Vaikka elohopea esiintyy kaasumuodossa, ei elohopeaa esimerkiksi tavattu kuin yhdestä tutkimuksen näytteestä. Mann et al. (1998) esittävätkin, etteivät mineralisaatioiden fyysiset olosuhteet ole aina suotuisia tehokkaalle geokaasun keräämiselle, vaan esimerkiksi maaperän liian suuri läpäisevyys voi johtaa kaasuhäviöihin.

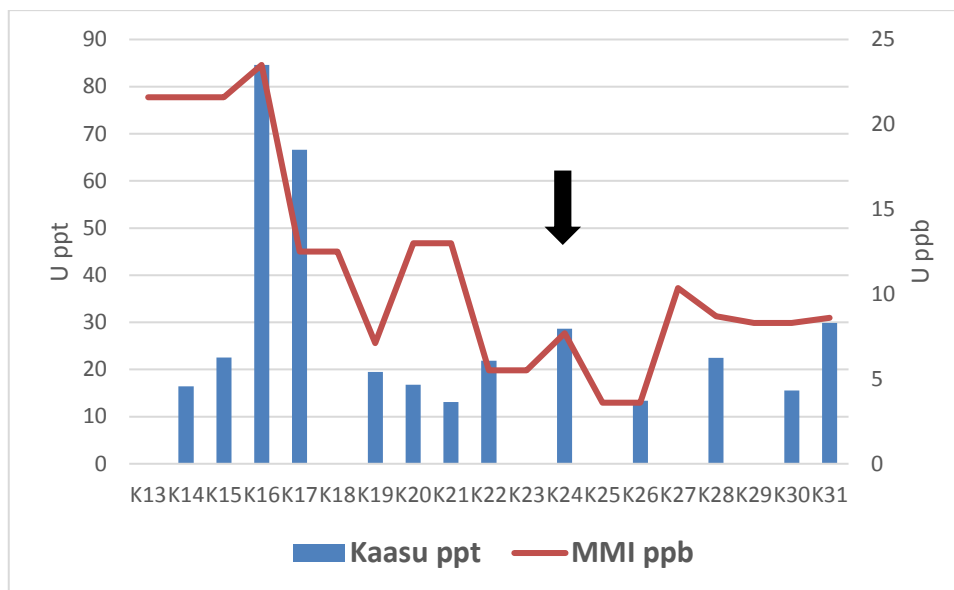
Geokaasumenetelmän hyödyntämiseksi Länsi-Lapin paksujen maapeitteiden alueella on tärkeä ymmärtää myös, millainen suhde geokaasuilla on yleisesti käytettyihin MMI-menetelmän maaperänäytteisiin. Asiaa tutkittiin Kelontekemällä, josta on saatavilla vertailuaineistoa tutkimuslinjan lähetyviltä Hannukainen Mining Oy:n MMI-tuloksista (Liite 4). Kelontekemän kaasunäytteissä Hg, As, Co ja Ni jäivät alle määrittämissä, mutta MMI-näytteissä alkuaineista oli havaittu vähäisiä pitoisuuksia. Nikkelin pitoisuuksien olisi voinut olettaa näkyvän kaasuissakin, mutta näin ei ole. Kuuden muun Kelontekemän kaasunäytteissä havaitun alkuaineen osalta kaasunäytteiden pitoisuuksia verrattiin suoraan lähimpään tarjolla olevaan MMI-tulosarvoon. Keskimäärin MMI-näytteet ovat kymmenen metrin säteellä kaasujen näytepisteistä, poikkeuksena hieman kauempana olevat linjan alku- ja loppupään pisteet. Geokaasujen ja MMI-näytteiden suhdetta on havainnollistettu Kuvissa 19 a.-e.



Kuva 19 a. Kelontekemän linjan kaasutulosten ja kymmenen metrin säteellä olevien MMI-tulosten rautapitoisuuksien suhde.



Kuva 19 b.-d. Kelontekemän linjan kaasutulosten ja kymmenen metrin säteellä olevien MMI-tulosten suhde sinkin, lyijyn ja kromin osalta.



Kuva 19 e. Kelontekemän linjan kaasutulosten ja kymmenen metrin säteellä olevien MMI-tulosten uraanipitoisuuksien suhde

Kuvaajiin piirretty musta nuoli osoittaa Kelontekemän tutkimuslinjan näytepisteen, jossa geokaasun ja vertailtavan MMI-maaperänäytteen sijainnit osuivat lähes yksiin. Näin ollen kaasujen ja maaperänäytteiden pitoisuuksien yhteys tulee luotettavimmin esiin juuri tällä kohdalla. Kuvaajat osoittavat, että geokaasujen ja MMI-pitoisuuksien välillä on kiistaton yhteys. Huomionarvoista silti on, että kaasujen ja maaperänäytteiden pitoisuuksissa voi olla tuhatkertainen ero. Sinkki ja kupari olivat kuudesta tarkastellusta alkuaineesta ainoat, joilla pitoisuudet ovat molemmissa näytteissä ppb. Kupari muodosti kuudesta alkuaineesta kuitenkin poikkeuksen siinä, ettei Kelontekemältä kaasuista mitatuista kolmesta kuparipitoisuudesta suurin korreloinut lainkaan MMI-näytteen kanssa. Syy saattaa tosin olla pitoisuuden sijoittuminen tutkimuslinjan alkuun, jossa etäisyys vertailuarvoon on hieman pidempi.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Analyysitekniikan kehittymisen myötä geokemiallisen malminetsinnän kentällä on nyt sijaa myös geokaasujen kaltaiselle erittäin pienten pitoisuuksien menetelmälle. Tämän tutkimuksen tulokset ovat mielenkiintoisia ja puhuvat menetelmän käyttökelpoisuuden puolesta. Hannukaisen kaivosalueen tunnettu mineralisaatio Länsi-Lapissa oli

mahdollista paikantaa maapeitteen alta geokaasujen avulla. Kaasuanomalia piirtyi esiin selvästi. Tutkimusalueista laaditut kaasupitoisuuksien jakaumadiagrammit osoittivat myös hyvin erot mineralisaation sisältävien alueiden ja Jolhikon arvometalleista köyhän tausta-alueen välillä.

Vaikka geokaasujen ja MMI-maaperänäytteiden pitoisuuksilla näyttää olevan yhteys, ovat kaasukuljetus ja kaasuanomalian muodostuminen kompleksinen ilmiö, jota on syytä vielä tutkia ennen menetelmän laajamittaista käyttöönottoa. On tärkeä ymmärtää paremmin, mitkä tekijät ohjaavat kaasujen ilmenemistä maaperän pintaosissa esimerkiksi juuri Länsi-Lapin moreenimailla. Osa alkuaineista vaikuttaa tulosten valossa esiintyvän havaittavina pitoisuuksina kaasuissa useammin eikä mineralisaation luonne yksistään selitä asiaa. Esimerkkinä ovat ilmanäytteissä havaitut kromi, lyijy, uraani, rauta ja sinkki. Nikkeli näkyy kaasupitoisuutena vasta, kun sitä on paljon. Samoin on todennäköistä, että tutkimusalueilla on elohopeaa, arseenia ja kobolttia pieninä pitoisuuksina, vaikka pitoisuudet eivät kaasutuloksissa näyäkään.

Kaasumenetelmän etuna on, että näyte saadaan kuplitettua happoon muutamassa minuutissa suoraan analysoitavissa olevaan muotoon eikä esikäsittelylle laboratoriossa ole siksi tarvetta. Näytteenotto ei vaadi suuria kuoppia, mutta toisaalta näytteenottajia on oltava useampia ja työ vaatii tarkkuutta ja jatkuvaa kontaminaatoriskien hallintaa näytteiden keräämisen aikana. Saatujen tulosten valossa geokaasumenetelmällä lienee paljon annettavaa tulevaisuuden tutkimukselle.

7. KIITOKSET

Lämmin kiitos graduprojektin liikkeelle laittaneelle ja alkutaipaleen ohjaajalleni professori Veli-Pekka Saloselle ja muille kenttätöihin osallistuneille Tiina Kaipaiselle (os. Nurminen), Kirsti Korkka-Niemelle ja Northland Mines Oy:n edustajille Jussi Annanollille ja Eetu Jokelalle. Kirsti Korkka-Niemelle erityisen suuri kiitos myös gradun loppuajan ohjauksesta ja kannustamisesta. Hannukainen Mining Oy:tä kiitän yhteistyöstä ja aineiston luovuttamisesta tutkielman vertailukäyttöön ja Northland Mines Oy:tä tutkimukseen liittyvän näytteenoton mahdollistamisesta. Kaasunkeraimen suunnittelusta ja rakentamisesta sekä näytteiden analysoinnista osoitan kiitokseni Juhani Virkaselle,

kemian avuista Seppo Lindroosille ja tutkielman teknisestä ohjauksesta ja ystävällisestä avusta vuosien mittaan Mia Kotilaiselle. Kiitän myös läheisiäni, jotka jaksoivat kannustaa minua kaivamaan gradun pöytälaatikosta vielä vuosien jälkeenkin ja tukivat väsymättömästi. Pro graduni haluan omistaa pikkusiskoni muistolle.

8. VIITELUETTELO

- Ahola, H. 2009. The application of the mobile metal ion technique in mineral exploration; two case studies in northern Fennoscandia. Pro gradu -tutkielma, Oulun yliopisto, geologian laitos, 103 s.
- Aspandiar, M.F., Anand, R.R. ja Gray, D.J. 2006. Geochemical dispersion mechanisms through transported cover: implications for mineral exploration in Australia. *CRC LEME Restricted Report* 230, 84 pp. (Uudelleenjulkaisu *Open File Report* 246, CRC LEME, Perth, 2008).
- Birrell, R. 1996. MMI geochemistry: mapping the depths. *Mining Magazine* 174 (5), 306-307.
- Cameron, E.M., Hamilton, S.M., Leybourne, M.I., Hall, G.E.M. ja McClenaghan, M.B. 2004. Finding deeply buried deposits using geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 4 (1), pp. 7-32.
- Cao, J.J., Hu, X.Y., Jiang, Z.T., Li, H.W. ja Zou, X.Z. 2010. Simulation of adsorption of gold nanoparticles carried by gas ascending from the Earth's interior in alluvial cover of the middle-lower reaches of the Yangtze River. *Geofluids* (2010) 10, 438-446.
- Coker, W.B. 2010. Future research directions in exploration geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 10 (1), 75-80.
- Eilu, P., Pankka, H., Keinänen, V., Kortelainen, V., Niiranen, T. ja Pulkkinen, E. 2007. Characteristics of gold mineralization in the greenstone belts of northern Finland. Teoksessa: Ojala, V.J. (toim), Gold in the Central Lapland greenstone belt, Finland. Geological Survey of Finland, Special Paper 44, 57-106.
- Fabris, A.J., Keeling, J.L. ja Fidler, R.W. 2009. Surface geochemical expression of bedrock beneath thick sediment cover, Curnamona Province, South Australia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 9 (3), 237-246.
- Gao, Y., Wang, M. ja Zhang, D. 2011. Application of 'metals-in-soil-gas' techniques to mineral exploration in exotic overburden. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 11 (2), 63-70.
- Geologian tutkimuskeskus, Geokemialliset provinssit, <https://hakku.gtk.fi>. Vierailtu 9.11.2020 ja 26.11.2020.
- Geologian tutkimuskeskus, Suomen kallioperä 1:200 000, <https://hakku.gtk.fi>. Vierailtu 9.11.2020 ja 23.11.
- Hale, M. 2010. Gas geochemistry and deeply buried mineral deposits: The contribution of the applied geochemistry research group, imperial college of science and technology, London. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 10 (3), 261-267.
- Hannukainen Mining Oy, www.hannukaisenkaivos.fi. Vierailtu 5.11.2020.
- Hiltunen, A., 1982. The Precambrian geology and skarn iron ores of the Rautuvaara area, Northern Finland. Geological Survey of Finland Bulletin 318, 133 s.
- Hirner, A.V., Krupp, E., Schulz, F., Koziol, M. ja Hofmeister, W. 1998. Organometal(loid) species in geochemical exploration: preliminary qualitative results. *Journal of Geochemical Exploration* 64, 133-139.
- Johansson, P., Lunkka, J.P. ja Sarala, P. 2011. The glaciation of Finland. *Developments in Quaternary Sciences*, 15 (9), 105-116.

- Klusman, R.W. 2009. Transport of ultratrace reduced gases and particulate, near-surface oxidation, metal deposition and adsorption. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 9 (3), 203-213.
- Koljonen, T. (toim.) 1992. The geochemical atlas of Finland, part 2: till. Geologinen tutkimuskeskus, Espoo, 218 s.
- Lehtinen, M., Nurmi, P. ja Rämö, T. (toim.) 1998. Suomen kallioperä: 3000 vuosisiljoonaa. Helsinki, Suomen Geologinen Seura ry., 375 s.
- Lehtonen, M., Airo, M.L., Eilu, P., Hanski, E., Kortelainen, V., Lanne, E., Manninen, T., Rastas, P., Räsänen, J. ja Virransalo, P. 1998. Kittilän vihreäkivialueen geologia, Lapin vulkaniittiprojektin raportti. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti 140, 144 s.
- Maanmittauslaitos, taustakartta, www.paikkatietoikkuna.fi. Vierailtu 16.11.2020 ja 23.11.2020.
- Malmqvist, L. ja Kristiansson, K. 1984. Experimental evidence for an ascending microflow of geogas in the ground. *Earth and planetary science letters*, 70 (2), 407-416.
- Mann, A.W., Birrell, R.D., Fedikow, M.A.F. ja de Souza, H.A.F. 2005. Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 5 (3), 201-210.
- Mann, A.W., Birrell, R.D., Mann, A.T., Humphreys, D.B., Perdrix, J.L. 1998. Application of the mobile metal ion technique to routine geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 61 (1-3), 87-102.
- Niiranen, T. 2005. Iron oxide-copper-gold deposits in Finland: case studies from the Peräpohja schist belt and the Central Lapland greenstone belt. Väitöskirja, Helsingin yliopisto, geologian laitos.
- Niiranen, T. ja Eilu, P. 2007. Kolari IOCG deposit. Teoksessa: Ojala, V.J., Weihed, P., Eilu, P. ja Iljina, M. (toim.), Metallogeny and tectonic evolution of the Northern Fennoscandian Shield: Field trip guidebook. Geologian tutkimuskeskus, Opas 54, 64-70.
- Northland Mines Oy (toim.) 2013. Hannukaisen kaivoshanke, Ympäristövaikutusten arviointiselostus, Kolari, s. 123-131.
- Ojala, V.J., Weihed, P., Eilu, P. ja Iljana, M. 2007. Metallogeny and tectonic evolution of the Northern Fennoscandian Shield: Field trip guidebook, Geological Survey of Finland Opas 54, 99s.
- Polito, P.A., Clarke, J.D.A., Bone, Y. ja Viellenave, J. 2002. A CO₂-O₂-light hydrocarbon-soil-gas anomaly above the Junction orogenic gold deposit: A potential alternative exploration technique. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 2 (4), pp. 333-344.
- Pöyry Environment Oy, 2008. Pajalan ja Kolarin rautakaivoshankkeet. Maaperän ja pohjaveden perustilaselvitys, Lopullinen raportti. Teoksessa: Northland Mines Oy (2013), Hannukaisen kaivoshanke, Ympäristövaikutusten arviointiselostus, Liite 11, 13 s.
- Salonen, V.P. (toim.) 2011. Kolarin Hannukaisen alueen maaperän kerrostumat ja pohjavesigeologiset olosuhteet, Tiivistelmä. Teoksessa: Northland Mines Oy (2013), Hannukaisen kaivoshanke, Ympäristövaikutusten arviointiselostus, Liite 13, 5s.
- Wan, W., Wang, M., Hu, M. ja Gao, Y. 2017. Identification of metal sources in Geogas from Wangjiazhuang copper deposit, Shandong, China: Evidence from lead isotopes. *Journal of geochemical exploration* 172, 167-173.
- Wang, M.-Q., Gao, Y.-Y., Liu, Y.-H. 2008. Progress in the collection of Geogas in China. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 8 (2), 183-190.

9. LIITTEET

Liite 1. Nollanäytteiden tulokset

Liite 2. Tulostaulukko

Liite 3. Maaperänäytteiden tausta-arvot ja metalli- ja arseeniprovinssit (GTK, Tapir-taustapitoisuusrekisteri, <https://gtkdata.gtk.fi/Tapir>) 3s.

Liite 4. MMI-tulokset vertailuun (Hannukainen Mining Oy)

Lite 1.

Nollanäytteiden tulokset ppb (nestetilavuudessa)

	Cr	Fe	Co	Ni	As	Hg	Pb	U	Cu	Zn
N1.	0,265	2,53	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0,059	0,0010	<0.178	<0.935
N2.	0,250	14,25	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0,088	0,0021	<0.178	<0.935
N3.	0,160	7,76	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0,073	0,0013	<0.178	<0.935
N4.	0,244	2,86	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0,061	0,0009	<0.178	<0.935
N5.	0,543	3,68	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0,084	0,0019	<0.178	<0.935
N6.	0,233	12,85	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0,061	0,0022	<0.178	<0.935
N7.	0,161	17,00	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0,072	0,0027	<0.178	<0.935
N8.	0,163	8,39	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0,084	0,0025	<0.178	<0.935
N9.	0,191	7,55	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0,066	0,0016	<0.178	<0.935
N0.	0,254	2,58	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0,062	0,0010	<0.178	<0.935
Keskiaarno	0,246	7,95					0,071	0,0017		
Keskiahajonta	0,112	5,25					0,011	0,0007		
Variaatiokerroin%	45,5	66,1					15,6	38,8		
Mediaani	0,239	7,66					0,069	0,0017		

Lite 2.

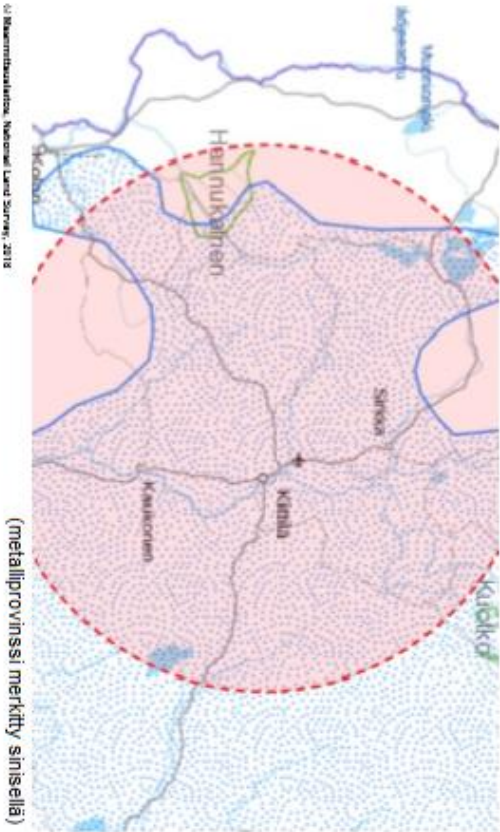
Geoakaasututkimuksen tulokset ppb (nestetilavuudessa)

Mittauksen tulokset ovat ppb-osikoin alia. *-sarakkeessa on esitetty tukieliemassa käydyt korjatut arvot (mitattu pituus - nolliinhyteliden keskiaivo).

näyte	nimike	Cr	Fe	Co	Ni	As	Hg	Pb	U	Cu	Zn
2D	H1	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb
3D	H1H	<0.124	0.257	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	<0.011	<0.0028	<0.178	14.69
4D	H2	0.262	0.262	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.143	0.0037	0.0037	3.08
5D	H3	0.253	22.45	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.125	0.0024	0.0024	<0.935
6D	H4	0.278	4.63	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.090	0.0015	<0.178	2.56
7D	H5	0.202	4.24	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.120	0.0020	0.0020	<0.935
8D	H6	0.239	15.26	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.115	0.0078	<0.178	10.77
9D	H7	0.274	7.63	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.085	0.0034	<0.178	2.05
10D	H8	0.173	4.72	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.098	0.0020	<0.178	9.19
11D	H9	0.543	14.62	<0.011	0.175168	<0.024	<0.018	0.151	0.0044	<0.178	51.44
12D	H11	0.220	4.41	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.087	0.0016	<0.178	115.77
13D	H10	0.209	8.96	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.110	0.0028	<0.178	32.35
14D	A2H	0.403	6.95	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.254	0.0033	<0.178	<0.935
15D	H12	0.214	5.54	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.077	0.0019	<0.178	4.59
16D	A3K	0.160	2.98	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.062	0.0013	<0.178	<0.935
17D	K13	0.203	4.08	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.068	0.0013	<0.178	1.13
18D	K14	0.264	6.00	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.082	0.0024	1.61	1.13
19D	K15	0.277	9.52	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.096	0.0032	<0.178	4.00
20D	K16	0.251	4.82	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.098	0.0121	<0.178	60.24
21D	K17	0.457	18.71	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.131	0.0095	<0.178	14.34
22D	K18	0.182	2.66	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.068	0.0013	0.26	<0.935
23D	K19	0.199	17.89	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.070	0.0028	<0.178	8.40
26D	K20	0.207	9.23	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.076	0.0024	0.30	27.80
27D	K21	0.215	3.02	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.074	0.0019	<0.178	<0.935
28D	K22	0.242	8.93	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.132	0.0031	<0.178	1.98
29D	K23	0.227	4.75	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.074	0.0015	<0.178	<0.935
30D	K24	0.331	28.29	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.108	0.0041	<0.178	41.14
31D	K25	0.223	4.33	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.080	0.0013	<0.178	17.07
32D	K26	0.190	6.49	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.077	0.0019	<0.178	1.21
33D	K27	0.270	4.49	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.074	0.0016	<0.178	<0.935
34D	K28	0.274	15.71	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.109	0.0032	<0.178	20.18
35D	K29	0.179	5.06	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.071	0.0014	<0.178	1.06
36D	K30	0.206	11.56	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.081	0.0022	<0.178	<0.935
37D	A4K	0.165	3.48	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.060	0.0013	<0.178	12.82
38D	K31	0.260	12.14	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.097	0.0043	<0.178	16.91
39D	A5J	0.177	6.55	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.081	0.0028	<0.178	49.05
40D	J32	0.236	14.75	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.118	0.0044	<0.178	<0.935
41D	J33	0.210	10.98	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.064	0.0027	<0.178	<0.935
42D	J34	0.259	5.06	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.061	0.0016	<0.178	<0.935
43D	J35	0.212	4.50	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.065	0.0019	<0.178	11.79
44D	J36	0.231	31.06	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.098	0.0096	<0.178	7.47
45D	J37	0.258	11.88	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.075	0.0018	<0.178	<0.935
47D	J38	0.165	3.36	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.062	0.0013	<0.178	<0.935
48D	J39	0.171	2.86	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.056	0.0014	<0.178	<0.935
49D	J40	0.156	17.54	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.062	0.0019	<0.178	<0.935
50D	A6J	0.167	10.83	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.061	0.0025	<0.178	<0.935
51D	J41	0.148	5.98	<0.011	<0.109	<0.024	0.02515	0.092	0.0038	3.20	2.49
52D	J42	0.222	8.25	8.3	<0.109	<0.024	<0.018	0.067	0.0025	<0.178	<0.935
53D	J43	0.263	14.12	0.018866	<0.109	<0.024	<0.018	0.110	0.0027	<0.178	<0.935
55D	A7J	0.170	3.28	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.064	0.0022	<0.178	<0.935
56D	J44	0.185	8.16	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.056	0.0012	<0.178	<0.935
57D	J45	0.202	8.73	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.074	0.0097	<0.178	<0.935
58D	J46	0.197	3.70	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.060	0.0014	1.93	<0.935
59D	J47	0.166	6.04	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.085	0.0045	<0.178	<0.935
60D	J48	0.174	6.56	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.061	0.0020	<0.178	<0.935
61D	J49	0.190	5.64	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.071	0.0017	<0.178	<0.935
62D	J50	0.165	5.59	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.061	0.0021	<0.178	<0.935
63D	J51	0.147	4.58	<0.011	<0.109	<0.024	<0.018	0.055	0.0015	<0.178	<0.935

Liite 3.

Maaperän taustapitoisuudet



© Maanmittauslaitos, National Land Survey, 2018

GTK:n Maaperän taustapitoisuudet (TAPRI) -karttapalvelu 28/11/2020

Näyte/tyyppi: Luonnonmaa: moreeni

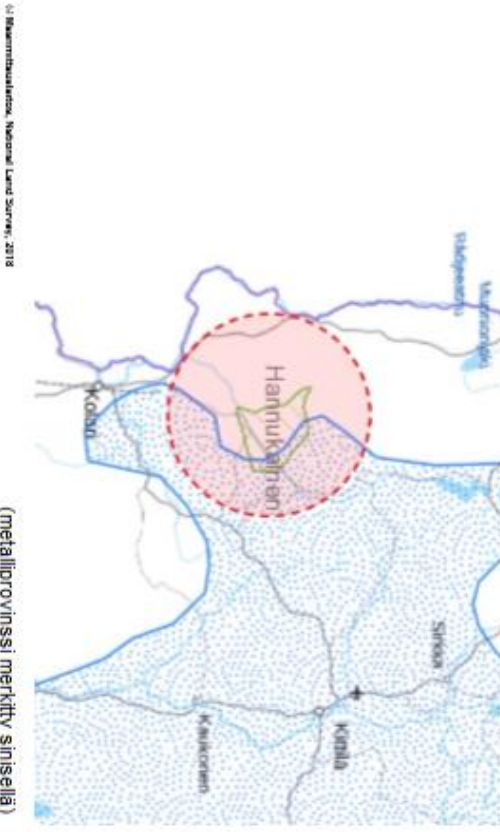
Alla 2 mm rakekoko, kumungaveiteiluotteesta tai väkivät typpihappoliuos.

Alueavaruus: Ympäristön etäisyys, etäisyys 40 km
Koordinatit: N:402907 E:7505273 (EUREF-TWGSFN)

8 TTP = suurin suositeltu taustapitoisuusarvo

	Sb mg/kg	As mg/kg	Hg mg/kg	Cd mg/kg	Co mg/kg	Cr mg/kg
N = 1258	45	43	44	45	1255	1255
analysoituja kpl	0.04	2.37	0.02	0.03	10.64	44.36
keskiarvo	0.02	1.14	0.01	0.02	9.39	37.69
mediaani	0.5	21.36	0.04	0.17	49.39	259.0
maksimi	0.01	0.54	0.01	0.02	6.4	26.19
prosentti 25	0.03	3.47	0.02	0.03	13.46	51.04
prosentti 75	0.06	7.9	0.04	0.05	24.0	85.0
8 TTP	2	5	0.50	1	20	100
Kynnysarvo	100	60	50	200	100	-

Maaperän taustapitoisuudet



© Maanmittauslaitos, National Land Survey, 2018

GTK:n Maaperän taustapitoisuudet (TAPRI) -karttapalvelu 28/11/2020

Näyte/tyyppi: Luonnonmaa: moreeni

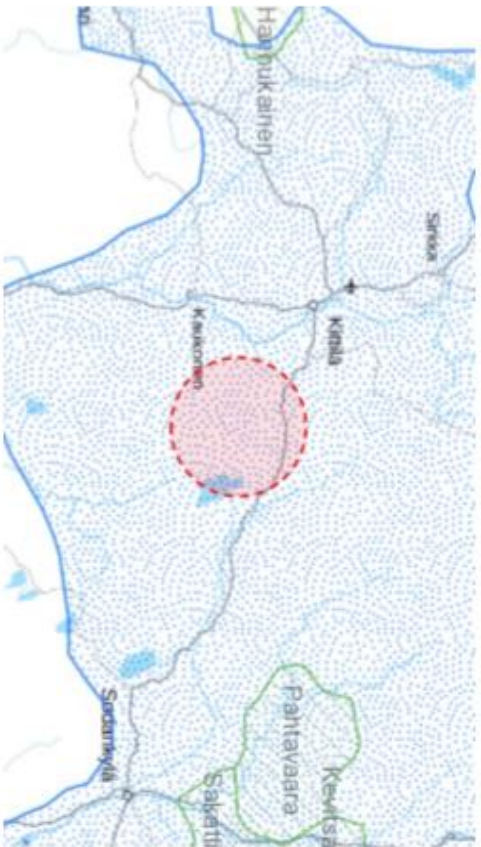
Alla 2 mm rakekoko, kumungaveiteiluotteesta tai väkivät typpihappoliuos.

Alueavaruus: Ympäristön etäisyys, etäisyys 10 km
Koordinatit: N:389040 E:7487778 (EUREF-TWGSFN)

8 TTP = suurin suositeltu taustapitoisuusarvo

	Sb mg/kg	As mg/kg	Hg mg/kg	Cd mg/kg	Co mg/kg	Cr mg/kg
N = 93	22	22	22	22	93	93
analysoituja kpl	-	-	-	-	5.95	26.61
keskiarvo	-	-	-	-	5.96	26.12
mediaani	-	-	-	-	17.09	56.49
maksimi	-	-	-	-	4.5	21.97
prosentti 25	-	-	-	-	7.18	30.87
prosentti 75	-	-	-	-	11.0	44.0
8 TTP	2	5	0.50	1	20	100
Kynnysarvo	100	60	50	200	100	-

Maaperän taustapitoisuudet



(metalliprovinssi merkitty sinisellä)

(c) Reentrainment, National Land Survey, 2018

GTx:n Meesperiin haustapitoleuudet (TAPIR) -karttapalvelu 28/11/2020

Nyberg-Crypff, Luonnomaa: moreen

Alle 2 mm raskoko. Kuningasvelliuotus tai väkivä byphtapoliuotus.

Alueavallinnat: Ympyrän eläin, cäde 10 km
Keskiköde: N:42821 E:748840 (EUREF TM36FIN)

Kelontekemä

	Se mg/kg	As mg/kg	Hg mg/kg	Cd mg/kg	Cu mg/kg	Cr mg/kg
N = 81						
analyzed/total kg/d	2	2	2	2	81	81
background	-	-	-	-	13.01	83.62
medicinal	-	-	-	-	12.32	84.26
max/limit	-	-	-	-	33.14	173.9
prod./dist. 25	-	-	-	-	10.66	62.91
prod./dist. 75	-	-	-	-	15.36	100.31
8 ATP	-	-	-	-	22.0	160.0
lym/ingestivo	2	5	0.10	1	20	100

	Cu mg/kg	Pb mg/kg	Ni mg/kg	Zn mg/kg	V mg/kg	Ti mg/kg
N = 31						
analytical	81	2	80	81	81	1
sediments						
background	34.95	-	43.72	32.47	57.04	-
median	29.66	-	38.16	26.47	55.77	-
maximum	148.01	-	108.3	118.69	127.77	-
precipitate	24.99	-	29.97	21.96	48.35	-
precipitate 75	37.24	-	51.14	36.48	81.8	-
ATP	56.0	-	83.0	58.0	81.0	-
Kymenlahti	100	60	50	200	100	-

Maaperän taustapitoisuudet



(metalliprovinssi merkitty sinisellä)

© Department of the Interior, National Land Survey, 2018

GT-Kun Maesteren buesapitolcaudet (TAFIR) -kartapsiweu 28/11/2020

Nyctaglyptis Luomomies: moreni

Alle 2 mm raskoko. Kuningasvepilluutut tai väreis typpihapolluutut.

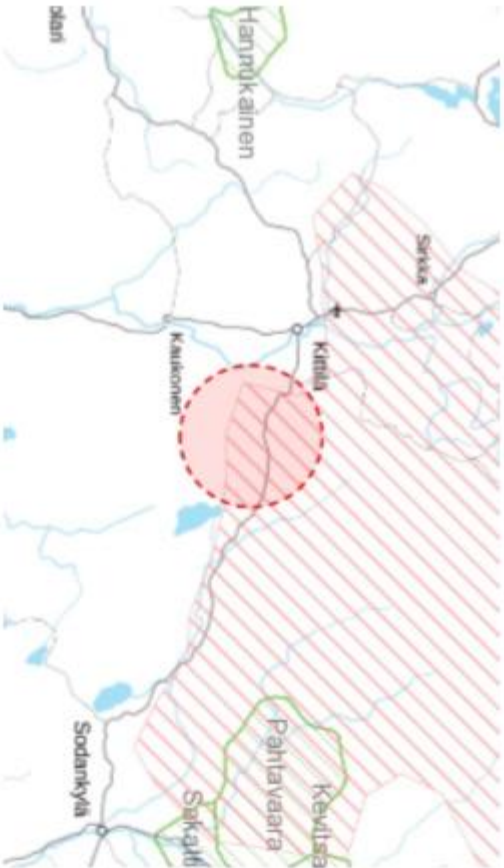
Aluevalmistaja: Ympyrän eläintarha, esäde 10 km
Keskipiste: N:400383 E:7618031 (EUREF TM36FIN)

JOINIKKO

	St mg/kg	As mg/kg	Hg mg/kg	Cd mg/kg	Co mg/kg	Cr mg/kg
N = 82						
analyzable kpi	4	4	4	4	82	82
background	-	-	-	-	12.83	40.39
median	-	-	-	-	10.75	34.08
maximum	-	-	-	-	41.41	161.86
proc.pile 25	-	-	-	-	8.32	26.34
proc.pile 75	-	-	-	-	18.45	44.25
81tp	-	-	-	-	26.0	71.0
Kyungnam	2	5	0.50	1	20	100

	Cu, mg/kg	Pb, mg/kg	Ni, mg/kg	Zn, mg/kg	V, mg/kg	Ti, mg/kg
N = 12						
analytical kit	82	4	82	82	82	3
Nekevo	39.1	-	28.27	31.71	62.19	-
medicinal	32.6	-	22.59	24.3	61.28	-
medicinal	94.11	-	104.47	156.48	118.41	-
proc.pils 25	23.77	-	16.95	19.06	45.92	-
proc.pils 75	51.74	-	30.69	35.65	77.73	-
8TP	94.0	-	52.0	130.0	-	-
Kyngesano	100	60	50	200	100	-

Maaperän taustapitoisuudet



62 Maanmittauslaitos, National Land Survey, 2018
GTK:n Maaperän taustapitoisuudet (TAPIN) karttapalvelu 28/11/2020
(arseeniprovinssi merkitty punaisella)
Aluevalinta: Ympyrän sisällä, etäisyys 10 km
Koordinatit: N:42868 E:740828 (EUREF TM35FIN)

Kelontekemä

Maaperän taustapitoisuudet



62 Maanmittauslaitos, National Land Survey, 2018
GTK:n Maaperän taustapitoisuudet (TAPIN) karttapalvelu 28/11/2020
(arseeniprovinssi merkitty punaisella)
Aluevalinta: Ympyrän sisällä, etäisyys 10 km
Koordinatit: N:40068 E:751688 (EUREF TM35FIN)

Jolhikko

Liite 4.

MMI-näyte	As (ppb)	Co (ppb)	Cr (ppb)	Cu (ppb)	Fe (ppm)	Hg (ppb)	Ni (ppb)	Pb (ppb)	U (ppb)	Zn (ppb)	MMI-näytettä lähinnä olevat Kelontekemän kaasunäytteet*
M1	19	32,1	381	59	83,7	1,1	150	149	21,6	230	K13
M2	17	24,1	823	215	140,5	0,7	96	31	23,5	40	K16
M3	10	22,4	566	227	113	0,8	193	44	12,5	40	K17
M4	11	48,8	580	293	70,6	0,6	197	92	7,1	20	K19
M5	14	58,8	704	497	136,5	0,9	231	21	13	40	K20
M6	9	80,5	1190	364	67,2	0,4	489	181	5,5	100	K22
M7	9	63,7	1290	499	91,5	0,9	458	137	7,7	130	K22
M8	6	136	828	356	55,5	0,4	647	16	3,6	10	K23
M9	5,5	102,5	510,5	526	36,7	0,4	828,5	24	10,35	40	K24 (koordinaatit osuvat lähes yksin)
M10	11	62,4	552	532	55,8	0,7	339	69	8,7	150	K25
M11	15	41	1400	258	67,1	0,3	2720	130	8,3	140	K26
M12	17	118,5	2380	235	99,8	0,6	2990	620	8,6	150	K27
											K28
											K29
											K30
											K31

MMI-maaperänäytteet ovat Hannukainen Mining Oy:n tuloksia.

*(kaasu- ja MMI-näytteiden etäisyys toisistaan keskimäärin kymmenen metriä tai alle)